

# 수중 자율이동체의 장시간 수중항법 성능 개선을 위한 표준 수력학 모델 기반 속도 추정필터 설계

## Gertler-Hagen Hydrodynamic Model Based Velocity Estimation Filter for Long-term Underwater Navigation Without External Position Fix

이 윤 하\* · 나 원 상† · 김 광 훈\*\* · 안 명 환\*\*\* · 이 범 직§

(Yunha Lee · Won-Sang Ra · Kwanghoon Kim · Myonghwan Ahn · Bum-Jik Lee)

**Abstract** - This paper proposes a novel velocity estimator for long-term underwater navigation of autonomous underwater vehicles(AUVs). Provided that an external position fix is not given, a viable goal in designing a underwater navigation algorithm is to reduce the divergence rate of position error only using the sporadic velocity information obtained from Doppler velocity log(DVL). For such case, the performance of underwater navigation eventually depends on accuracy and reliability of external velocity information. This motivates us to devise a velocity estimator which can drastically enhance the navigation performance even when the DVL measurement is unavailable. Incorporating the Gertler-Hagen hydrodynamics model of an AUV with the measurement models of velocity and depth sensors, the velocity estimator design problem is resolved using the extended Kalman filter. Different from the existing methods in which an AUV simulator is regarded as a virtual sensor, our approach is less sensitive to the model uncertainty often encountered in practice. This is because our velocity filter estimates the simulator errors with sensor aids and furthermore compensates these errors based on the indirect feedforward manner. Through the simulations for typical AUV navigation scenarios, the effectiveness of the proposed scheme is demonstrated.

**Key Words** : AUV, long-term navigation, Velocity estimation, Hydrodynamics, DVL, SDINS

### 1. 서 론

수중 자율이동체(AUV: autonomous underwater vehicle)가 진수(進水), 경로계획 및 추종, 귀환, 수중탐색 등 다양한 임무를 성공적으로 완수하기 위해서는 정확한 위치 및 자세정보를 제공할 수 있는 항법기술이 뒷받침되어야 한다. 특히, 센서 사용에 제약이 존재하는 수중에서 장시간에 걸쳐 장거리를 이동하는 AVU의 경우, 운용시간이 늘어나더라도 항법오차를 효과적으로 제한할 수 있는 항법 알고리즘의 개발은 더욱 중요한 의미를 갖는다 [1].

일반적인 순수항법 알고리즘은 관성센서(IMU: inertial measurement unit) 출력에 대한 적분과정을 거쳐 자율이동체의 위치 및 자세 정보를 산출한다. 하지만, IMU 오차의 누적으로 인해, 순수항법 알고리즘에 의해 산출된 항법오차 역시 일반적으로

시간에 따라 급격히 증가하는 경향을 보인다. 순수항법 오차의 발산을 억제하기 위한 방편으로, 외부센서로부터 간헐적으로 제공되는 정보를 활용하여 순수항법 오차를 추정 및 보상하기 위한 보정항법 필터가 흔히 사용된다[2]. 지상 혹은 공중에서 운용되는 자율이동체의 경우, GPS 혹은 지자기 센서를 이용하여 보정항법 필터를 손쉽게 설계할 수 있으나, 불행하게도 수중에서는 GPS의 전파 신호 수신이 불가능할 뿐만 아니라, 심해 잠수정과 같이 AUV의 동체 재질에 따라 지자기센서의 사용이 원천적으로 불가능한 경우가 많다. 설령 지자기센서를 사용할 수 있는 상황이라 할지라도, 열수에 의한 지자기 변화를 모델링하기 어려워 장시간 수중항법에는 그 사용이 쉽지 않다[3].

이렇듯 센서 사용에 있어 다양한 제약조건이 존재하는 수중 운용환경을 고려하여 음향신호, 해저지형 및 속도측정치를 활용한 수중 보정항법 필터 설계 방법들이 연구되어 왔다. 음향항법 및 해저지형 대조 항법은 국지적 수중항법으로는 비교적 높은 정확도의 위치 정보를 제공하지만, 데이터베이스화 할 수 있는 해저지형의 범위 제한으로 인해 장거리 항법에 적용하는 데 한계가 있는 것으로 알려져 있다[4]. 이와달리 속도측정치를 이용한 보정항법은 대지속도계(DVL: Doppler velocity log)로부터 획득되는 절대속도 및 대수 속력계(EML: electromagnetic log)의 상대속력 측정치를 사용하는 방법으로, 장시간에 걸쳐 장거리를 이동하는 AUV의 보정 항법을 위한 실질적 대안으로 받아들여지고 있다[4]. 하지만 수중에서는 외부에서 주어지는 속도보정 정보만

† Corresponding Author : School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, Korea

E-mail: wonsang@handong.edu

\* School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, Korea

\*\* Core Tech R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

\*\*\*Combat System R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea

§ Submarine Combat System Part, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, Korea

Received : August 24, 2016; Accepted : October 10, 2016

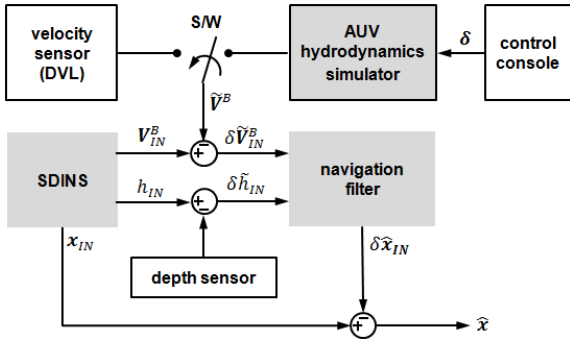


그림 1 기존의 수리학 모델기반 보정항법 알고리즘  
**Fig. 1** Previous method for model-aided underwater navigation

으로는 위치오차에 대한 가관측성이 확보되지 않으므로, 보조센서로부터 획득된 위치정보에 기반하여 스트랩다운형 관성항법장치(SDINS: strapdown inertial navigation system)의 위치오차를 최소화하는 전통적인 방식과 다른 형태로 보정항법 필터가 설계되어야 한다. 즉, 수중 보정항법필터는 보조센서로부터 획득된 속도정보만을 이용하여 SDINS의 위치오차 발산을 가급적 억제하는 것을 차선의 설계 목표로 삼으며, 이는 SDINS의 속도오차를 완벽히 제거할 수 있다면 이론적으로 SDINS의 위치오차가 일정한 범위 내로 제한된다는 데 근거한 것이다[6]. 하지만, 실제 상황에서는 DVL의 비정적 오차 특성으로 인해 속도측정치를 이용한 수중 보정항법 필터가 SDINS의 위치오차 발산을 완벽히 억제할 수 없다. DVL의 경우 해저지면에 대한 음파의 도플러 편이량을 측정하여 비교적 높은 정확도의 3축 동체속도 정보를 제공하나, 해저지면과의 거리가 멀어지는 경우 속도정보 획득이 불가능하기 때문이다. 따라서 장시간 수중항법 성능을 향상시키기 위해서는 사용되는 DVL 속도 측정치의 비가용한 상황에서도 안정적인 속도정보를 획득 방법을 고안할 필요가 있다.

이에 대한 대안으로 AUV의 동력학 모델(이하 시뮬레이터)을 활용한 SDINS 오차 추정기법이 제안되었다[6,7]. 이 방법의 핵심 아이디어는 그림 1과 같이 AUV 시뮬레이터를 가상의 보조 센서처럼 간주하고, 이를 이용하여 수중 보정항법 알고리즘을 설계하는 것이다. 이 경우, 보조 센서로부터 속도 측정치가 제공되지 않는 상황에서도 시뮬레이터 출력을 사용하여 수중 보정항법 필터를 구동할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 보조센서 측정치와 시뮬레이터 출력을 선택적으로 사용하는 방식을 취함으로써, 모델의 불확실성에 매우 취약하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존 수중 보정항법 알고리즘의 문제점이 AUV 시뮬레이터 출력을 직접 사용하는 데서 비롯된 것이라는 점에 착안하여, 그림 2와 같이 동체좌표계 속도 추정필터를 설계하고 이를 보정항법 입력으로 활용하는 방법을 제안한다. AUV 동특성을 필터 설계모델에 반영하는 경우, AUV가 적절히 기동한다면 DVL 출력이 주어지지 않더라도 상당기간 만족할 만한 속도추정치 얻을 수 있다. 이는 상호결합되어 있는 AUV수평 및 수직채널 동특성을 활용하여 동체 속도에 대한 가관측성을 간접적으로 확보할 수 있기 때문이다. 또한, 제안된 방법은 간접 약먹임 구조를

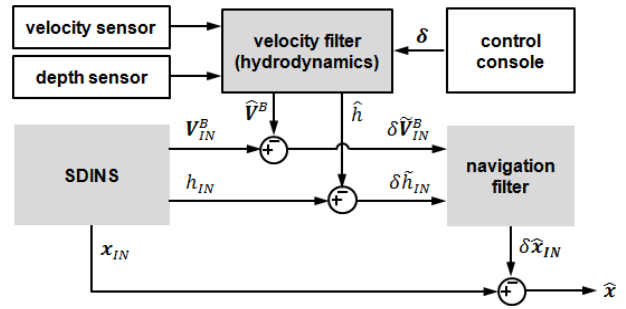


그림 2 속도필터 기반 수중 보정항법  
**Fig. 2** Velocity filter-aided underwater navigation

채택함으로써 기존 방법에 비해 수리학모델의 불확실성에 상대적으로 둔감한 특성을 보이며, DVL 및 EML 두 속도센서의 측정주기가 비동기되어 있더라도 보정항법필터 주기에 맞춰 속도정보를 제공할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 전형적인 AUV 장시간 장거리 이동 궤적에 대해 모의실험을 수행하고, 그 결과를 분석함으로써 제안한 방법의 성능 및 유효성을 입증한다.

## 2. 수중 자율이동체 수리학 모델

수리학 모델 기반 속도 추정필터 설계를 위해 사용되는 주요 변수 및 표기법은 다음과 같이 요약된다.

- $F^B \equiv [F_x^B \ F_y^B \ F_z^B]^T$  : 동체좌표계 수력 힘
- $M^B \equiv [K \ M \ N]^T$  : 동체좌표계 수력 모멘트
- $F^a, M^a$  : 부가관성에 의한 힘, 모멘트
- $F^s, M^s$  : 유체속도에 의한 정적 힘, 모멘트
- $F^d, M^d$  : 유체점성에 의한 힘, 모멘트
- $F^b, M^b$  : 부력 및 중력에 의한 힘, 모멘트
- $F^c, M^c$  : 조종타 및 추력에 의한 힘, 모멘트
- $m, l$  : AUV의 질량 및 길이
- $W, B$  : AUV의 중량 및 부력
- $R_N, R_E$  : 지구의 자오선 반지름, 횡 곡률반경
- $r_G \equiv [0 \ 0 \ z_G]^T$  : 원점에 대한 무게중심의 위치
- $r_B \equiv [0 \ 0 \ z_B]^T$  : 원점에 대한 부력중심의 위치
- $I_x, I_y, I_z$  : 관성모멘트
- $\delta \equiv [\delta_r \ \delta_b \ \delta_s]^T$  : rudder, bow, stern 조종타 편각
- $\rho \equiv [\lambda \ A \ h]^T$  : 위도, 경도, 고도
- $\epsilon \equiv [\psi \ \theta \ \phi]^T$  : 요, 피치, 롤 자세각
- $f^B$  : 동체좌표계 비력벡터
- $V^B \equiv [u \ v \ w]^T$  : 동체좌표계 속도벡터
- $V_r^B \equiv [u_r \ v_r \ w_r]^T$  : 동체좌표계 조류에 대한 속도벡터
- $V^N \equiv [v^N \ v^E \ v^D]^T$  : 항법좌표계 속도벡터
- $R_\chi(\epsilon)$  : 회전행렬( $\chi$ 축을 중심으로  $\epsilon$ 만큼)

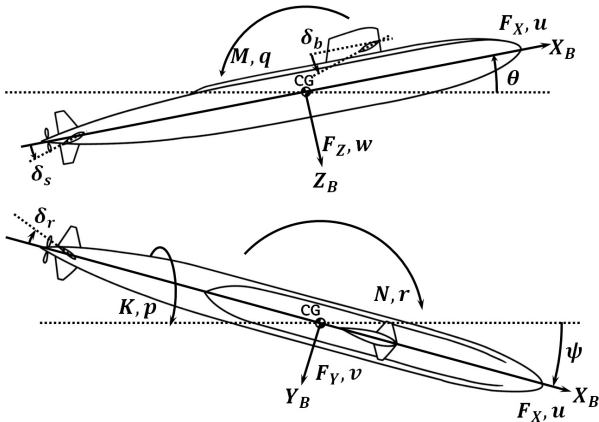


그림 3 동체좌표계 정의  
Fig. 3 Definition of body frame

- $C_E^N \equiv R_y \left( -\lambda - \frac{\pi}{2} \right) R_z(\lambda)$  : 지구-항법좌표계 간 좌표변환 행렬
- $C_B^N \equiv R_x(\phi) R_y(\theta) R_z(\psi)$  : 항법-동체좌표계 간 좌표변환행렬
- $\omega_{EB}^B \equiv [p \ q \ r]^T$  : 지구고정좌표계에 대한 동체좌표계의 회전 각속도벡터
- $\omega_{IE}^E \equiv [0 \ 0 \ \omega_e]^T$  : 관성좌표계에 대한 지구고정좌표계의 회전각속도벡터
- $\omega_{IE}^N \equiv [\Omega^N \ 0 \ \Omega^D]^T$  : 항법좌표계에서 표현된 지구고정좌표계의 회전각속도벡터
- $\omega_{EN}^N \equiv [\rho^N \ \rho^E \ \rho^D]^T$  : 지구고정좌표계에 대한 동체좌표계의 회전각속도벡터
- $(\eta)_\times \equiv \begin{bmatrix} 0 & -\eta_z & \eta_y \\ \eta_z & 0 & -\eta_x \\ -\eta_y & \eta_x & 0 \end{bmatrix}$  :  $\eta = [\eta_x \ \eta_y \ \eta_z]^T$ 에 대한 왜대칭행렬
- $V$  : 동체속력
- $\|\xi\|$  : 벡터  $\xi$ 의 2-norm
- $s_\xi$  : 변수  $\xi$ 의 부호
- $\xi_{IN}$  : SDINS 출력
- $\delta\xi = \xi_{IN} - \xi$  : SDINS 출력  $\xi_{IN}$ 의 오차
- $\sigma_\xi$  : 센서  $\xi$ 의 측정잡음 표준편차

수력학 모델 기술을 위해 도입된 동체좌표계의 정의는 그림 3에 도시한 바와 같다. 동체좌표계의  $X_B$ 축은 AUV의 진행방향과 일치하며,  $Y_B$ 축은 동체 우측방향으로 정의되는 오른손 좌표계이다.

전술한 좌표계 정의에 따라, 수심 변화율과 동체 속도벡터 간의 관계를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\dot{h} \equiv G_h \mathbf{V}^B, \quad G_h \equiv [\sin\theta \quad -\cos\theta\sin\phi \quad -\cos\theta\cos\phi] \quad (1)$$

만약, AUV 무게중심이 종단면 상에서 편심되어 있지 않고 ( $x_G \approx y_G \approx 0$ ) 관성행렬의 비대각 성분을 무시할 수 있다면,

AUV의 6자유도 운동방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} \overline{M} \overline{E} \\ \overline{D} \overline{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}^B \\ \dot{\omega}_{EB}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{RB}(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \\ \mathbf{h}_{RB}(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}^B(\dot{\mathbf{V}}^B, \mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \\ \mathbf{M}^B(\dot{\mathbf{V}}^B, \mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $\overline{M}$ ,  $\overline{J}$ ,  $\overline{E}$ ,  $\overline{D}$ 는 AUV의 물성치를 반영하기 위한 행렬이며,  $\mathbf{f}^{RB}$ ,  $\mathbf{h}^{RB}$ 는 AUV의 강체운동을 기술하기 위한 함수이다. 이들의 정의는 각각 다음과 같다.

$$\overline{M} \equiv mI^{3 \times 3}, \quad \overline{E} \equiv mz_G \begin{bmatrix} 0 & 10 \\ -100 & 0 \end{bmatrix}, \quad \overline{D} \equiv mz_G \begin{bmatrix} 0 & -10 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \overline{J} \equiv \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{RB}(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \\ \mathbf{h}_{RB}(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{f}_\omega^{RB}(\omega_{EB}^B) + \mathbf{f}_{v\omega}^{RB}(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) + \mathbf{f}_{v\epsilon}^{RB}(\mathbf{V}^B) \\ \mathbf{h}_\omega^{RB}(\omega_{EB}^B) + \mathbf{h}_{v\omega}^{RB}(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}_v^{RB} \equiv -2\overline{M} C_N^B \omega_{IE}^N \times \mathbf{V}^B, \quad \mathbf{f}_\omega^{RB} \equiv \omega_{EB}^B \times (\overline{D} \omega_{EB}^B),$$

$$\mathbf{f}_{v\omega}^{RB} \equiv -\overline{M} (\omega_{EB}^B)_\times \mathbf{V}^B,$$

$$\mathbf{h}_\omega^{RB} \equiv (\overline{J} \omega_{EB}^B)_\times \omega_{EB}^B, \quad \mathbf{h}_{v\omega}^{RB} \equiv \mathbf{V}^B \times (\overline{D} \omega_{EB}^B) - \omega_{EB}^B \times (\overline{D} \mathbf{V}^B)$$

AUV 속력에 비해 조류속력이 무시할 만 하다면, AUV에 작용하는 외력  $\mathbf{F}^B$ 와 모멘트  $\mathbf{M}^B$ 는 Gertler-Hagen 표준 수력모델을 따른다[9]. 수력학적 특성을 결정하는 수력계수 ( $X_\chi$ ,  $Y_\chi$ ,  $Z_\chi$ ) 및 ( $K_\chi$ ,  $M_\chi$ ,  $N_\chi$ )은 수조(水槽)에서 수행되는 실험을 통해 사전에 그 값을 모델링할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}^B \\ \mathbf{M}^B \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{F}^a + \overline{\mathbf{F}}^B \\ \mathbf{M}^a + \overline{\mathbf{M}}^B \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{F}}^B \\ \overline{\mathbf{M}}^B \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{F}^s + \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^d + \mathbf{F}^b \\ \mathbf{M}^s + \mathbf{M}^c + \mathbf{M}^d + \mathbf{M}^b \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서

$$\mathbf{F}^a(\dot{\mathbf{V}}^B, \dot{\omega}_{EB}^B) \equiv [M_A \ E_A] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}^B \\ \dot{\omega}_{EB}^B \end{bmatrix}, \quad M_A \equiv \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & Z_w \end{bmatrix}, \quad E_A \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ Y_p & 0 & Y_r \\ 0 & Z_q & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}^s(\mathbf{V}^B) \equiv \begin{bmatrix} X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2 \\ Y_*u^2 + Y_vuv + Y_{vw}vw + Y_{v|v|R}v\sqrt{v^2 + w^2} \\ \left( Z_*u^2 + (Z_w w + Z_{w|w})u + Z_{vw}v^2 \right) \\ \left( (Z_{w|w}w + Z_{ww}|w|)\sqrt{v^2 + w^2} \right) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}^c(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \equiv \begin{bmatrix} X_{\delta,\delta_r}\delta_r^2 + X_{\delta,\delta_s}\delta_s^2 + X_{\delta,\delta_b}\delta_b^2 + au^2 + buu_c + cu_c^2 \\ Y_{|r|\delta_r}u|r|\delta_r + Y_{\delta_r}u^2\delta_r \\ Z_{q|\delta_s}u|q|\delta_s + Z_{\delta_s}u^2\delta_s + Z_{\delta_b}u^2\delta_b \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}^d(\mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B) \equiv \begin{bmatrix} X_{qq}q^2 + X_{rr}r^2 + X_{rp}rp + X_{vr}vr + X_{wq}wq \\ \left( Y_{p|p|}p|p| + Y_{pq}pq + Y_{qr}qr + Y_{vq}vq + Y_{\phi\phi} + Y_{wr}wr \right) \\ \left( + Y_rur + Y_pup + Y_{v|r|} \frac{v}{|v|} \sqrt{v^2 + w^2} |r| \right) \\ \left( Z_{pp}p^2 + Z_{rr}r^2 + Z_{rp}rp + Z_{vr}vr + Z_{vp}vp \right) \\ \left( + Z_quq + Z_{w|q|} \frac{w}{|w|} \sqrt{v^2 + w^2} |q| \right) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}^b \equiv (W-B) \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}^a(\dot{\mathbf{V}}^B, \dot{\boldsymbol{\omega}}_{EB}^B) \equiv [D_A J_A] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}^B \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{EB}^B \end{bmatrix}, D_A \equiv \begin{bmatrix} 0 K_v & 0 \\ 0 & 0 M_w \\ 0 N_v & 0 \end{bmatrix}, J_A \equiv \begin{bmatrix} K_p & 0 & K_r \\ 0 & M_q & 0 \\ N_p & 0 & N_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}^s(\mathbf{V}^B) \equiv \begin{bmatrix} K_* u^2 + K_v uv + K_{vw} vw + K_{|v|} v \sqrt{v^2 + w^2} \\ \left( M_* u^2 + M_{vv} v^2 + (M_w w + M_{|w|} |w|) u \right. \\ \left. + (M_{w|w|} w + M_{ww} |w|) \sqrt{v^2 + w^2} \right) \\ N_* u^2 + N_v uv + N_{vw} vw + N_{v|v|} v \sqrt{v^2 + w^2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}^c(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \equiv \begin{bmatrix} K_\delta u^2 \delta_r \\ M_{|q|\delta_s} u |q| \delta_s + M_{\delta_s} u^2 \delta_s + M_{\delta_b} u^2 \delta_b \\ N_{|r|\delta_r} u |r| \delta_r + N_{\delta_r} u^2 \delta_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}^d(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \equiv \begin{bmatrix} \left( K_{qr} qr + K_{pq} pq + K_{p|p|} |p| |p| \right. \\ \left. + K_{p|p|} |p| + K_r ur + K_{vq} vq + K_{wp} wp + K_{wr} wr \right) \\ M_{pp} p^2 + M_{rr} r^2 + M_{rp} rp + M_{|q|} |q| \\ \left( M_{vr} vr + M_{vp} vp + M_{qu} qu + M_{w|q|} \sqrt{v^2 + w^2} q \right) \\ \left( N_{pq} pq + N_{qr} qr + N_{|r|} |r| |r| + N_{wr} wr + N_{wp} wp \right) \\ \left. + N_{vq} vq + N_{vp} vp + N_r r + N_{v|r|} v \sqrt{v^2 + w^2} r \right) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}^b \equiv \begin{bmatrix} -y_B B \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi \\ x_B B \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \sin \theta \\ -x_B B \cos \theta \sin \phi - y_B B \sin \theta \end{bmatrix}$$

수력모델 (3)을 AUV 운동방정식 (2)에 대입한 후, 부가질량 (added mass)에 의한 외력  $\mathbf{F}^a$ 와 모멘트  $\mathbf{M}^a$ 를 좌변으로 이항하면 AUV의 운동방정식을 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}^B \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{EB}^B \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{f}_v(\mathbf{V}^B) + \mathbf{f}_\omega(\boldsymbol{\omega}_{EB}^B) + \mathbf{f}_{v\omega}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \\ \mathbf{h}_v(\mathbf{V}^B) + \mathbf{h}_\omega(\boldsymbol{\omega}_{EB}^B) + \mathbf{h}_{v\omega}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_v \\ \mathbf{g}_\omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때, 다음 행렬을 정의하면

$$\begin{bmatrix} A_{vf} & A_{vm} \\ A_{\omega f} & A_{\omega m} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \bar{M} - M_A & \bar{E} - E_A \\ \bar{D} - D_A & \bar{J} - J_A \end{bmatrix}^{-1}$$

식 (1)~(3)으로부터 함수  $\mathbf{f}_x$ ,  $\mathbf{h}_x$ ,  $\mathbf{g}_x$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_v &\equiv A_{vf}(\mathbf{f}_v^{RB} + \mathbf{F}^s) + A_{vm} \mathbf{M}^s, \\ \mathbf{f}_\omega &\equiv A_{\omega f} \mathbf{f}_\omega^{RB} + A_{\omega m} \mathbf{h}_\omega^{RB}, \\ \mathbf{f}_{v\omega} &\equiv A_{vf}(\mathbf{f}_{vw}^{RB} + \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^d) + A_{vm}(\mathbf{h}_{v\omega}^{RB} + \mathbf{M}^c + \mathbf{M}^d), \\ \mathbf{h}_v &\equiv A_{vf}(\mathbf{h}_v^{RB} + \mathbf{F}^s) + A_{vm} \mathbf{M}^s, \\ \mathbf{h}_\omega &\equiv A_{\omega f} \mathbf{h}_\omega^{RB} + A_{\omega m} \mathbf{h}_\omega^{RB}, \\ \mathbf{h}_{v\omega} &\equiv A_{vf}(\mathbf{h}_{vw}^{RB} + \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^d) + A_{vm}(\mathbf{h}_{v\omega}^{RB} + \mathbf{M}^c + \mathbf{M}^d), \\ \mathbf{g}_v &\equiv A_{vf} \mathbf{F}^b + A_{vm} \mathbf{M}^b, \quad \mathbf{g}_\omega \equiv A_{\omega f} \mathbf{F}^b + A_{\omega m} \mathbf{M}^b, \end{aligned}$$

### 3. 표준 수력학 모델 기반 AUV 속도추정 알고리즘

#### 3.1 시뮬레이터 오차 방정식

앞 절에서 유도된 AUV 동특성 모델 (1)~(4)를 이용하여 AUV의 속도 산출을 위한 시뮬레이터를 구현할 수 있다. 시뮬레이터

를 구동하기 위해서는 초기치, AUV 조종타 정보, SDINS 보정항법 필터에서 계산된 자세각 등이 필요하다. 이때, 사용되는 입력 정보에 오차가 존재하므로 시뮬레이터 출력  $\bar{\boldsymbol{\xi}}$ 에는 필연적으로 오차  $\delta \boldsymbol{\xi}$ 가 포함된다. 즉, AUV 상태변수 참값  $\boldsymbol{\xi}$ 는 다음 식을 만족한다.

$$\bar{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\xi} + \delta \boldsymbol{\xi} \quad (5)$$

위의 식에서

$$\boldsymbol{\xi} \equiv \begin{bmatrix} h \\ \mathbf{V}^B \\ \boldsymbol{\omega}_{EB}^B \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{\xi}} \equiv \begin{bmatrix} \bar{h} \\ \bar{\mathbf{V}}^B \\ \bar{\boldsymbol{\omega}}_{EB}^B \end{bmatrix}, \quad \delta \boldsymbol{\xi} \equiv \begin{bmatrix} \delta h_d \\ \delta \mathbf{V}^B \\ \delta \boldsymbol{\omega}_{EB}^B \end{bmatrix}$$

시뮬레이터에서 산출된 동체좌표계 속도정보에 오차가 존재하는 경우 SDINS 보정항법 필터의 성능에 직접적인 영향을 끼치므로, 이를 추정, 보상하기 위한 속도필터를 설계할 필요가 있다. 이를 위해, AUV 동특성 모델 (1)~(4)에 대한 섭동방정식을 유도함으로써 수력학 시뮬레이터 오차 모델을 연속시간 미분방정식 형태로 기술하자.

$$\delta \dot{\boldsymbol{\xi}} \approx A(\boldsymbol{\xi}) \cdot \delta \boldsymbol{\xi} \quad (6)$$

식 (5)의 행렬  $A(\cdot)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$A(\boldsymbol{\xi}) \equiv \begin{bmatrix} 0 A_{h2} & 0 \\ 0 A_{v2} & A_{v3} \\ 0 A_{\omega 2} & A_{\omega 3} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

여기서  $\chi = v, \omega$ 에 대해,

$$\begin{aligned} A_{h2} &\equiv G_h, \\ A_{\chi 2} &\equiv A_{\chi f} \left[ \frac{\partial \mathbf{f}_{RB}}{\partial \mathbf{V}^B} + \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial \mathbf{V}^B} \right] + A_{\chi m} \left[ \frac{\partial \mathbf{h}_{RB}}{\partial \mathbf{V}^B} + \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial \mathbf{V}^B} \right], \\ A_{\chi 3} &\equiv A_{\chi f} \left[ \frac{\partial \mathbf{f}_{RB}}{\partial \boldsymbol{\omega}_{EB}^B} + \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial \boldsymbol{\omega}_{EB}^B} \right] + A_{\chi m} \left[ \frac{\partial \mathbf{h}_{RB}}{\partial \boldsymbol{\omega}_{EB}^B} + \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial \boldsymbol{\omega}_{EB}^B} \right], \end{aligned}$$

참고로, 시뮬레이터 오차 모델을 정의하기 위한 부행렬 (sub-matrix)을 계산하기 위해 필요한 편미분 항들은 부록에 정리되어 있다.

#### 3.2 동체좌표계 속도오차 추정필터

연속시간 시뮬레이터 오차 방정식 (6)을 필터 샘플링주기  $T$ 로 이산화한 후 관계식 (5)를 대입하면, 동체좌표계 속도오차 추정 필터 설계를 위한 이산시간 비선형 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\delta \boldsymbol{\xi}_{k+1} = \mathbf{a}_k(\delta \boldsymbol{\xi}_k, \bar{\boldsymbol{\xi}}_k) + \boldsymbol{\epsilon}_k, \quad \boldsymbol{\epsilon}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}^{7 \times 1}, Q_k^v) \quad (8)$$

위의 식에서 비선형 함수  $\mathbf{a}(\cdot)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}(\delta \boldsymbol{\xi}_k, \bar{\boldsymbol{\xi}}_k) \equiv (I^{7 \times 7} + T \cdot A(\bar{\boldsymbol{\xi}}_k - \delta \boldsymbol{\xi}_k)) \delta \boldsymbol{\xi}_k$$

또한, 모델링 오차를 반영하기 위해 도입된 공정잡음  $\epsilon$ 는 편의상 영평균 백색 잡음으로 가정한다.

시뮬레이터 오차 측정치는 동체에 장착된 각속도계, 수심계, 속도센서(EML/DVL) 출력과 시뮬레이터 출력의 차이로 정의된다.

$$\delta y_k = \mathbf{c}(\delta \xi_k) + \nu_k \quad (9)$$

위의 식에 사용된 변수들의 정의는 다음과 같다.

$$\delta \mathbf{y} \equiv L \left[ \bar{h} - \tilde{h}_{ps} \parallel \bar{\mathbf{V}}^B \parallel - \tilde{V}_{EML} \bar{\omega}_{EB}^B - \bar{\omega}_{EB}^B \bar{\mathbf{V}}^B - \tilde{V}_{DVL}^B \right]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{c}(\delta \xi) \equiv L \begin{bmatrix} \frac{\delta h}{\sqrt{(\bar{\mathbf{V}}^B)^T (\bar{\mathbf{V}}^B)} - \sqrt{(\mathbf{V}^B)^T (\mathbf{V}^B)}} \\ \delta \omega_{EB}^B \\ \delta \bar{\mathbf{V}}^B \end{bmatrix},$$

$$L \equiv \begin{cases} I^{8 \times 8}, & (\text{DVL : available}) \\ \begin{bmatrix} I^{5 \times 5} & 0^{5 \times 3} \\ 0^{3 \times 5} & 0^{3 \times 3} \end{bmatrix}, & (\text{DVL : unavailable}) \end{cases}$$

수심계, EML, 각속도계 및 DVL 출력의 측정잡음 표준편차를 각각  $\sigma_{ps}$ ,  $\sigma_{EML}$ ,  $\sigma_g$ ,  $\sigma_{DVL}$ 이라하면, 영평균 백색 측정잡음  $\nu$ 의 분산은 다음과 같이 정의된다.

$$R^v = L \begin{bmatrix} \sigma_{ps}^2 & 0 & 0^{1 \times 3} & 0^{1 \times 3} \\ 0 & \sigma_{EML}^2 & 0^{1 \times 3} & 0^{1 \times 3} \\ 0^{3 \times 1} & 0^{3 \times 1} & \sigma_g^2 \cdot I^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 1} & 0^{3 \times 1} & 0^{3 \times 3} & \sigma_{DVL}^2 \cdot I^{3 \times 3} \end{bmatrix} L^T$$

참고로, AUV가 순항하는 경우 시뮬레이터 오차방정식을 구성하는 행렬  $\begin{bmatrix} A_{v2} & A_{w3} \\ A_{w2} & A_{w3} \end{bmatrix}$ 이 접근 안정한데, 이는 다양한 오차요인들이 동체좌표계 속도 산출에 지속적인 영향을 미치지 못함을 암시하는 것이다. 따라서, 각속도계 출력에 포함되어 있는 편향오차(drift), 비정렬오차(misalignment) 등을 무시한 채 측정방정식을 식 (9)와 같이 구성해도 무방하다.

이상의 모델링 결과로부터 시뮬레이터 속도오차 추정 필터 설계 문제가 식 (8) 및 식 (9)로 표현되는 이산시간 비선형 동적확률시스템에 대한 상태 추정문제로 귀결됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 편의상 확장 칼만필터를 적용하여 시뮬레이터의 속도오차를 추정한다.

• 측정치 갱신식

$$S_k^v = C_k P_{k|k-1}^v C_k^T + R_k^v, \quad C_k \equiv \frac{\partial \mathbf{c}(\delta \xi)}{\partial (\delta \xi)} \Big|_{\delta \xi = \delta \hat{\xi}_{k|k-1}} \quad (11)$$

$$P_{k|k}^v = (I - K_k^v C_k^v) P_{k|k-1}^v, \quad K_k^v = P_{k|k-1}^v C_k^T (S_k^v)^{-1}$$

$$\delta \hat{\xi}_{k|k} = \delta \hat{\xi}_{k|k-1} + K_k^v (\delta y_k - \mathbf{c}(\delta \hat{\xi}_{k|k-1}))$$

• 시간 갱신식

$$P_{k+1|k}^v = A_k P_{k|k}^v (A_k)^T + Q_k^v, \quad A_k = \frac{\partial \mathbf{a}(\delta \xi)}{\partial (\delta \xi)} \Big|_{\delta \xi = \delta \hat{\xi}_{k|k}} \quad (12)$$

$$\delta \hat{\xi}_{k+1|k} = \mathbf{a}_k(\delta \hat{\xi}_{k|k}, \xi_k^s)$$

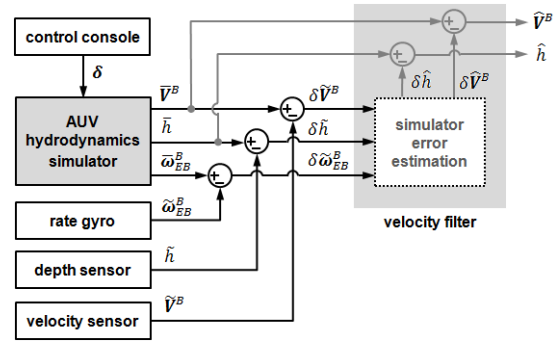


그림 4 간접 앞먹임 속도필터  
Fig. 4 Indirect feedforward velocity filter

설계되는 동체좌표계 속도추정 기법은 그림 4와 같이, 각속도/수심/속도 측정치를 이용하여 시뮬레이터 오차를 추정하고, 이를 간접 앞먹임 방식으로 보상하는 구조를 갖는다.

3.3 보정항법 필터

AUV에 탑재된 센서 출력을 대체하여 산출된 동체좌표계 속도 추정치를 이용해 SDINS 보정항법 필터를 설계할 수 있다. 보정항법 필터 설계를 위해 통상적인 방법을 그대로 적용하여 위치/속도/정렬자세오차와 각속도계/가속도계 편향오차를 상태변수로 하는 15차 오차모델이 사용된다[2]. 이를 위해 SDINS 항법 방정식을 고려하자.

$$\dot{\lambda} = \frac{v^N}{R_N + h},$$

$$\dot{A} = \frac{v^E}{(R_E + h) \cos \lambda} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{V}}^N = C_B^N \mathbf{f}^B - (2\omega_{IE}^N + \omega_{EN}^N) \times \mathbf{V}^N + \mathbf{g}^N$$

$$\dot{C}_B^N = C_B^N (\omega_{NB}^B)_{\times}$$

식 (13)에 대한 섭동방정식을 고려하면, 15차 SDINS 오차모델을 얻는다.

$$\delta \dot{\mathbf{x}}_{IN} \approx F \cdot \delta \mathbf{x}_{IN} \quad (14)$$

이때, 상태변수  $\delta \mathbf{x}_{IN}$  및 행렬  $F$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta \mathbf{x}_{IN} = \begin{bmatrix} \delta \rho_{IN} \\ \delta V_{IN}^N \\ \delta \phi_{IN} \\ \mathbf{B}_w \\ \mathbf{B}_a \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & 0^{3 \times 3} & F_{25} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} & 0^{3 \times 3} \\ 0^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{R_{NN} \rho^E}{R_N + h} & 0 & \frac{\rho^E}{R_N + h} \\ \frac{\rho^N}{\cos \lambda} \left( \tan \lambda - \frac{R_{EE}}{R_E + h} \right) & 0 & -\frac{\rho^N \sec \lambda}{R_E + h} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_N+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sec\lambda}{R_E+h} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\rho^E R_{NN}}{R_N+h} - (\rho^N \sec^2\lambda + 2\Omega_N) v^E \right) & 0 & \frac{\rho^E}{R_N+h} v^D - \rho^N \rho^D \\ -\rho^N \rho^D R_{EE} & & \\ \left( 2\Omega^N + \rho^N \sec^2\lambda + \rho^D \frac{R_{EE}}{R_E+h} \right) v^N & & \frac{\rho^D v^N - \rho^N v^D}{R_E+h} \\ -\left( \frac{\rho^N R_{EE}}{R_E+h} - 2\Omega^D \right) v^D & & \\ (\rho^N)^2 R_{EE} + (\rho^E)^2 R_{NN} - 2\Omega^D v^E & 0 & (\rho^N)^2 + (\rho^E)^2 \end{bmatrix},$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} \frac{v^D}{R_N+h} & 2\rho^D + 2\Omega^D & -\rho^E \\ -2\Omega^D - \rho^D \frac{v^N \tan\lambda + v^D}{R_E+h} & -2\Omega^N + \rho^N & \\ 2\rho^E & -2\Omega^N - 2\rho^N & 0 \end{bmatrix}, F_{23} = (J^N)_{\times}, F_{25} = C_B^N,$$

$$F_{31} = \begin{bmatrix} \Omega^D - \frac{\rho^N R_{EE}}{R_E+h} & 0 & -\frac{\rho^N}{R_E+h} \\ -\frac{\rho^E R_{NN}}{R_N+h} & 0 & -\frac{\rho^E}{R_N+h} \\ -\Omega^N - \rho^N \sec^2\lambda & 0 & -\frac{\rho^D}{R_E+h} \end{bmatrix}, F_{32} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_E+h} & 0 \\ -\frac{1}{R_N+h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan\lambda}{R_E+h} & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{33} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega^D + \rho^D & -\rho^E \\ -\Omega^D - \rho^D & 0 & \Omega^N + \rho^N \\ \rho^E & -\Omega^N - \rho^N & 0 \end{bmatrix}, F_{34} = -C_B^N.$$

식 (14)에서  $R_{EE}$ ,  $R_{NN}$ 은 각각 자오선 위도에 따른 곡률반경 및 횡 곡률반경 변화율을 의미한다.

위의 오차방정식을 이산화하면, SDINS 오차보정 필터 설계를 위한 시스템 방정식을 얻는다.

$$\delta\mathbf{x}_{k+1} = (I + T_s \cdot F_k(\mathbf{x}_k^{IN}, \delta\mathbf{x}_k))\delta\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \mathbf{w}_k \sim N(\mathbf{0}^{15 \times 1}, Q_k) \quad (15)$$

위의 식에서  $\mathbf{x}^{IN}$ 은 항법장치 출력,  $\mathbf{w}$ 는 모델링오차를 고려하기 위해 도입된 공정잡음으로, 분산이  $Q$ 인 영평균 백색잡음으로 가정한다.

AUV 동역학 시뮬레이터 및 3.2절에서 설계된 동체좌표계 속도 추정필터에 의해 산출된 AUV의 수심 및 동체좌표계 속도 출력과 SDINS 출력을 이용하여 오차 측정치를 정의할 수 있다. 오차 측정방정식은 다음과 같이 모델링된다.

$$\delta\mathbf{z} = \begin{bmatrix} h_{IN} - \hat{h} \\ \mathbf{V}_{IN}^N - C_B^N(\mathbf{e}_{IN}) \hat{\mathbf{V}}^B \end{bmatrix} = H \cdot \delta\mathbf{x}_{IN} + \mathbf{v}, \mathbf{v} \sim N(\mathbf{0}^{4 \times 1}, R) \quad (16)$$

여기서

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 6} \\ 0^{3 \times 3} & I^{3 \times 3} & -(\mathbf{V}^N)_{\times} & 0^{3 \times 6} \end{bmatrix}, H_{11} = \begin{bmatrix} 0^{2 \times 2} & 0^{2 \times 1} \\ 0^{1 \times 2} & 1 \end{bmatrix}$$

한편, 측정잡음  $\mathbf{v}$ 의 분산  $R$ 은 SDINS의 잡음특성 및 식 (11) 혹은 (12)에서 산출된 속도필터의 추정오차공분산  $P^v$ 를 이용하

여 설정 가능하므로, 식 (15) 및 식 (16)에 대해 확장 칼만필터를 설계함으로써 AUV에 장착된 SDINS의 항법오차를 손쉽게 추정 및 보상할 수 있다.

#### 4. 모의실험

제안된 수리학 모델 기반 속도필터의 유용성 확인을 위해 장 시간 잠항 시나리오에 대해 100회 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1에 정리된 AUV 기동 시나리오에 대한 AUV 기준궤

표 1 AUV 기동

Table 1 AUV maneuver

시간(hour)	잠수함 운동	DVL 출력
0.00~0.25	순항	가용
0.25~0.33	수심 300[m]까지 급하강	
0.33~0.75	수평면 나선 기동	
0.75~1.00	수심 150[m]로 상승	
1.00~2.00	순항	비가용
2.00~3.00	수평면 지그재그 기동	
3.00~5.00	순항	
5.00~5.25	해수면으로 상승	
5.25~5.50	순항	

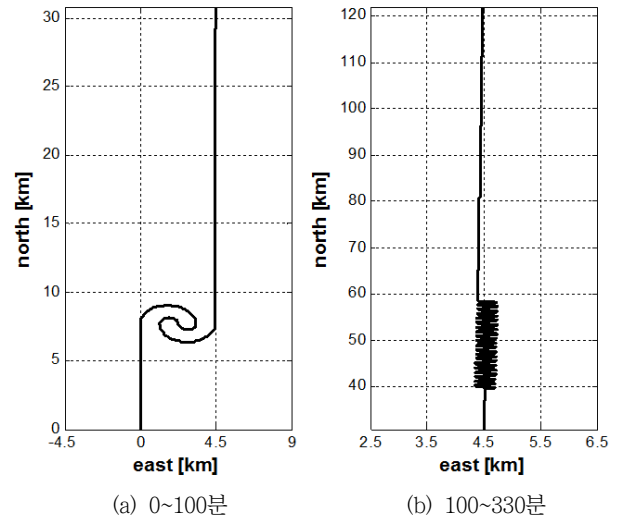


그림 5 AUV 수평면 궤적

Fig. 5 Horizontal trajectory of AUV

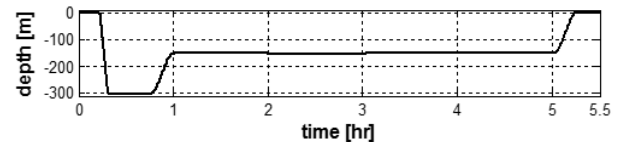


그림 6 AUV 수직면 궤적

Fig. 6 Vertical trajectory of AUV

적은 그림 5와 같다.

AUV에 탑재된 SDINS, DVL, EML 및 측심센서의 자료갱신주기는 각각 10[Hz], 1[Hz], 2[Hz], 100[Hz]으로 설정되었다. SDINS 및 보정센서 규격은 표 2에 정리한 바와 같다. AUV의 경우 수심 제어의 중요성으로 인해 SDINS에 측심센서 출력을 이용한 고도 안정화루프를 내장하고 있는 경우가 대부분이며 본 모의실험에서도 동일한 상황을 가정하였다.

시뮬레이션을 통해 산출된 SDINS의 수평축 및 수직축 위치오차의 RMSE는 그림 9에 도시한 바와 같다. 고도안정화루프가 정상동작하는 경우 SDINS의 항법오차는 대부분 수평축으로 전과된다. 수평축 위치오차는 슬러주기(약 84분)로 진동하며 서서히 증가하며 수평축 위치에 대한 RMSE 최대치는 5.5시간 경과 후 약 1.4[km]에 이른다.

장시간 수중 항법의 성능은 보조센서로부터 획득된 속도정보의 정확성에 따라 좌우되는 경향이 있다. 특히, 동체좌표계 속도 성분 측정치를 제공하는 DVL은 수중 항법성능에 지대한 영향을 미치므로, DVL 정보의 비가용 상황에서 항법오차 증가를 얼마나 억제할 수 있는지가 수중항법 알고리즘의 성능을 판단하는 척도 중 하나라 할 수 있다. 또한, 실제 상황에서는 AUV 시뮬레이터에 사용된 수력학 계수의 불확실성이 존재할 가능성이 높으므로, 모델 불확실성에 대한 민감도를 추가 분석할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 다음 경우들에 대한 성능분석을 수행한다.

- 경우 1. 수력계수 불확실성 없음
- 경우 2. 수력계수 불확실성 존재( $1\sigma = 10\%$ , 정규분포)

표 2 SDINS 및 센서 오차규격( $1\sigma$ )

Table 2 SDINS and sensor specifications( $1\sigma$ )

초기오차 (N-frame)		위치	$[10.0 \ 10.0 \ 1.0]^T [m]$
		속도	$[0.1 \ 0.1 \ 0.1]^T [m/s]$
		정렬자세	$[0.01 \ 0.01 \ 0.03]^T [\text{arcmin}]$
SDINS	가속도계 (B-frame)	편향오차	4[ $\mu g$ ]
		환산계수오차	0.3[ppm]
		측정잡음	4[ $\mu g \sqrt{\text{sec}}$ ]
	각속도계 (B-frame)	편향오차	2[ $mdeg/hr$ ]
		환산계수오차	0.3[ppm]
		측정잡음	0.4[ $mdeg/\sqrt{hr}$ ]
보조 센서	측심센서	측정잡음	0.5[m]
	EML	측정잡음	0.03[m/s]
	DVL(B-frame)	측정잡음	0.03[m/s]

표 3 속도필터 설계 파라미터

Table 3 Design parameter of velocity filter

초기공분산 ( $P_{0-1}^v$ )	고도 오차	1[m]
	속도 오차	$[1.0 \ 1.0 \ 1.0]^T [m/s]$
	각속도 오차	$[1.0 \ 1.0 \ 1.0]^T [deg/s]$
공정잡음 분산 ( $Q^v$ )	고도 오차	0.1[m/s]
	속도 오차	$[200 \ 0.5 \ 0.125]^T [mm/s^2]$
	각속도 오차	$[0.1 \ 0.1 \ 0.1]^T [deg/s^2]$

제안된 속도필터의 설계 파라미터를 표 3과 같이 설정하고, 속도필터 추정치를 이용하여 3.2절의 SDINS 보정항법 필터를 구동하였다. 속도필터의 유용성을 확인하기 위해, 기존에 제안된 바 있는 AUV 시뮬레이터 기반 항법필터를 함께 시뮬레이션 하

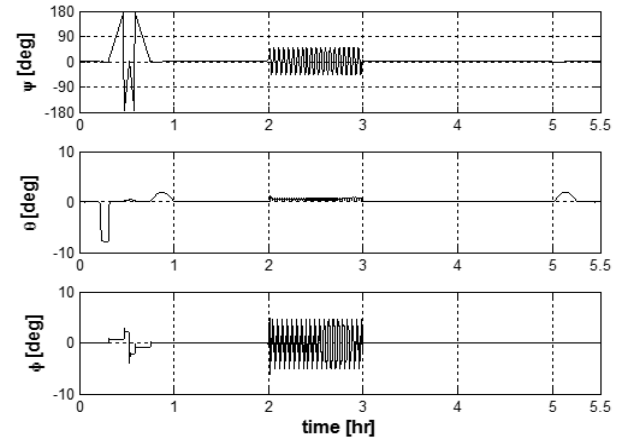


그림 7 AUV 자세

Fig. 7 AUV attitude

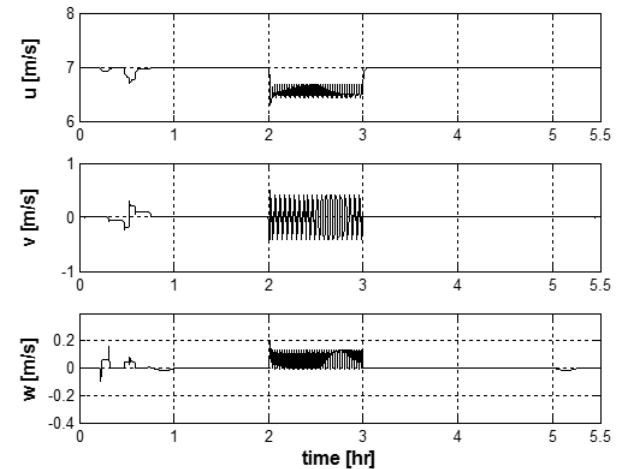


그림 8 AUV 동체좌표계 속도

Fig. 8 AUV velocity in B-frame

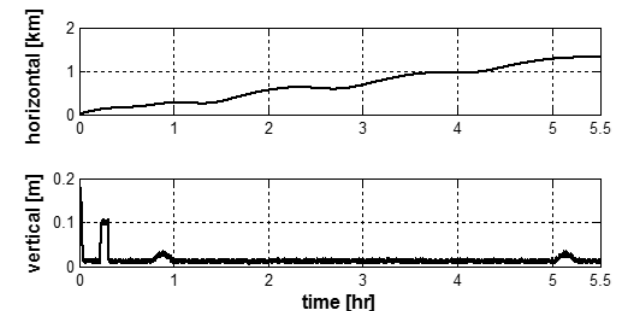


그림 9 SDINS 위치오차 RMS

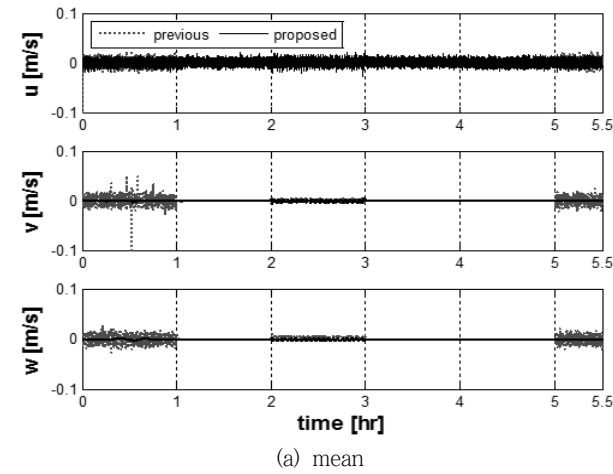
Fig. 9 RMS of SDINS position error

였다[7].

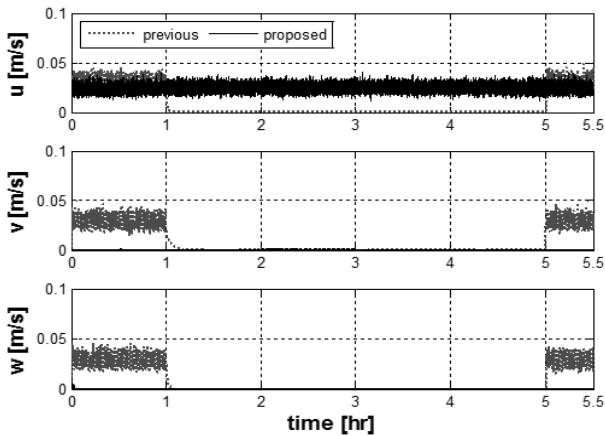
수력계수 불확실성 유무에 따른 모의실험 결과는 각각 그림 10~11(경우 1)과 그림 12~13(경우 2)에 도시한 바와 같다.

수력계수 불확실성이 존재하지 않는 경우에는 AUV 시뮬레이터 출력을 DVL 비가용 구간(1.0~5.5[hr])에서만 동작시키는 기존방법도 비교적 만족할 만한 속도정보를 제공한다는 것을 확인할 수 있다. 다만, AUV가 지그재그로 이동하는 구간에서 수치오

차로 인해 AUV 시뮬레이터의 속도출력에 다소간의 오차가 존재하는데, 이로 인해 수평면 위치오차(그림 11)가 DVL 비가용 구간에서 서서히 증가하는 경향성을 보인다. 이와 달리, 제안된 방법은 DVL 비가용 구간에서도 AUV 시뮬레이터의 속도 출력에 포함된 오차를 가용센서(EML, 수심계) 정보를 활용하여 효과적으로 추정/보상한다. 따라서, 제안한 방법을 사용하는 경우에는 보다 향상된 수중항법 성능을 획득할 수 있다.



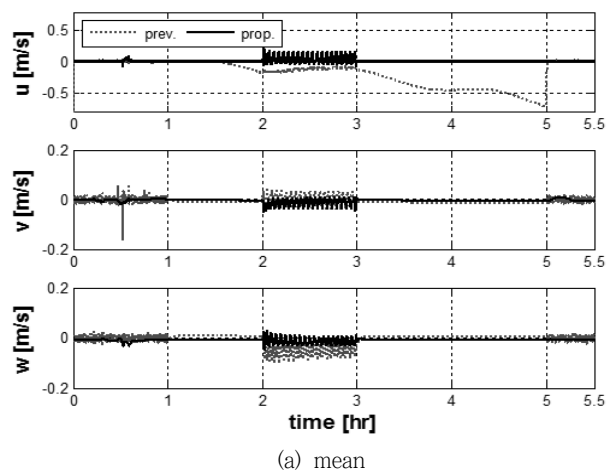
(a) mean



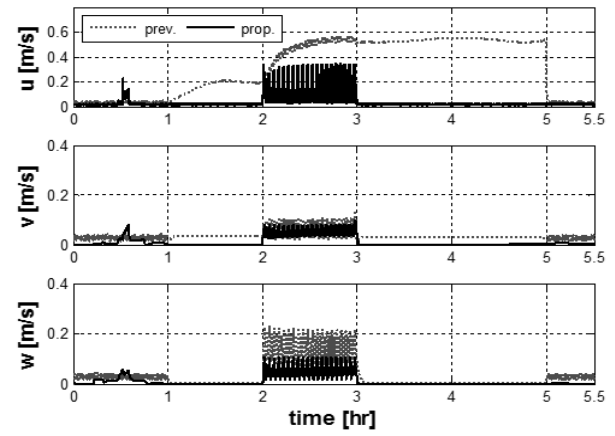
(b) standard deviation

그림 10 속도 추정오차: 경우 1

Fig. 10 Velocity estimation error: Case 1



(a) mean



(b) standard deviation

그림 12 속도 추정오차: 경우 2

Fig. 12 Velocity estimation error: Case 2

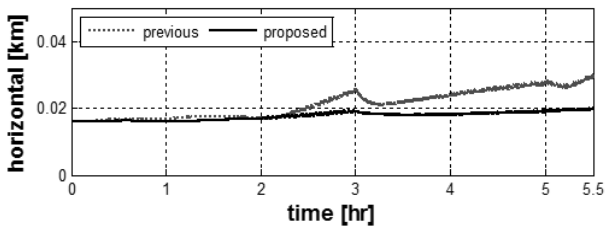


그림 11 수평면 거리오차 RMS: 경우 1

Fig. 11 RMS of horizontal distance error: Case 1

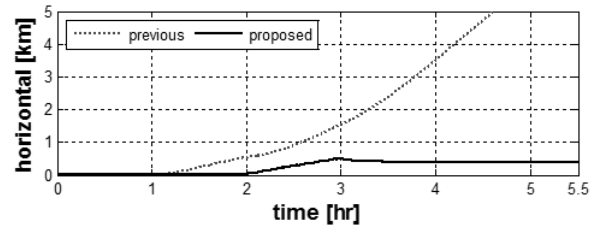


그림 13 수평면 거리오차 RMS: 경우 2

Fig. 13 RMS of horizontal distance error: Case 2



수력계수 불확실성이 존재하는 경우, 기존 방법에 의해 추정된 AUV 속도오차가 급격히 증가하는 양상을 보인다(그림 12). 종축 방향 속도오차의 평균은 시간이 지남에 따라 약  $-0.6[m/s]$ 까지 점진적으로 증가한다. 횡축방향 속도 추정치는 AUV 기동이 있는 경우에 오차가 증가하는 특성을 보이며, 순항 구간에서는 편향오차를 포함한다. 이러한 특성은 수력계수 불확실성에 의해 부정확한 종축-횡축 결합동특성이 AUV 시뮬레이터에 사용되었기 때문이다. 즉, 기존 방법의 경우, 수력계수 불확실성이 수중 보정항법 필터에 사용되는 속도정보의 정확도에 직접적으로 영향을 끼치게 된다. 반면, 제안된 방법은 수력계수 불확실성이 존재하더라도 대부분의 구간에서 기존 방법에 비해 상대적으로 우수한 속도 추정 성능을 보인다. 이는 제안된 방법이 필터구조를 채택함으로써 가용센서 정보에 의존하여 시스템 모델의 불확실성에 대한 민감도를 다소간 줄일 수 있기 때문이다. 이러한 장점은 그림 13의 수평면 위치오차에서도 분명하게 확인된다. 기존 방법의 경우, 수력계수 불확실성에 의해 유발된 속도오차에 의해 DVL 비가용 구간에서 수평면 거리오차가 발산한다. 이와 달리, 제안된 방법을 사용하는 경우에는 수력계수 불확실성이 존재하는 상황에서도 수평면 거리 오차가 약  $400[m]$  수준으로 제한된다. 이는 그림 9의 순수항법 오차  $1.4[km]$ 에 비해 대략적으로 수중항법 성능이 70% 가량 개선된 것이다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 장시간 잠항하여 GPS 등 외부에서 제공되는 위치정보를 사용할 수 없는 AUV의 수중항법을 위해, AUV 수력학 모델에 기반한 새로운 형태의 속도 추정필터를 제안하였다. 고안된 속도 추정필터는 AUV에 탑재된 속도센서 및 수심계 등을 활용하여, AUV 시뮬레이터 오차를 추정하고, 이를 간접 앞먹임 형태로 보상하는 구조를 갖는다. DVL 속도 측정치의 부재상황에서도 일정 수준의 속도추정 성능을 획득하기 위해, AUV의 수평-수직채널 동특성이 결합되어 있다는 데 착안하여 기존 방법과 달리 수심계 및 EML 정보가 적극적으로 활용되었다. 제안된 속도필터의 유용성을 확인하기 위해 일반적인 15차 SDINS 오차 추정필터를 설계하여 보정항법을 수행하였다. 모의실험을 통해 제안된 속도추정필터가 DVL 비가용 상황뿐만 아니라 수력계수 불확실성이 존재하는 경우에도 기존 방법에 비해 상대적으로 매우 우수한 속도추정 성능을 제공함을 확인할 수 있었다. 제안된 속도필터는 위치 혹은 자세 센서의 사용이 제한되는 장거리 이동 AUV의 장시간 수중항법성능을 개선하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

### 부 록

3.1절에서 AUV 수력학 모델 시뮬레이터의 오차모델을 유도하기 위해 필요한 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{RB}}{\partial \mathbf{V}^B} \equiv -M_{RB}(\omega_{EB}^B)_{\times} - 2M_{RB}(C_N^B \omega_{IE}^N)_{\times}$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{RB}}{\partial \omega_{EB}^B} \equiv M_{RB}(\mathbf{V}^B)_{\times} + m \begin{bmatrix} -z_{G^r} & 0 & -z_{G^p} \\ 0 & -z_{G^r} & -z_{G^q} \\ 2z_{G^p} & 2z_{G^q} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}_{RB}}{\partial \mathbf{V}^B} \equiv m \begin{bmatrix} z_{G^r} & 0 & -z_{G^p} \\ 0 & z_{G^r} & -z_{G^q} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}_{RB}}{\partial \omega_{EB}^B} \equiv \begin{bmatrix} -mz_{G^w} (I_y - I_z)r (I_y - I_z)q + mz_{G^u} \\ (I_z - I_x)r - mz_{G^w} (I_z - I_x)p + mz_{G^v} \\ (I_x - I_y)q (I_x - I_y)p & 0 \end{bmatrix}$$

편의상  $v_h \equiv \sqrt{v^2 + w^2}$  이라 하면 식 (3)의 수력학 모델의 정의로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial \mathbf{V}^B} \equiv \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial u} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial v} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial w} \right], \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial \omega_{EB}^B} \equiv \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial p} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial q} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial r} \right],$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial \mathbf{V}^B} \equiv \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial u} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial v} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial w} \right], \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial \omega_{EB}^B} \equiv \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial p} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial q} \quad \frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial r} \right]$$

여기서

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial u} \equiv \begin{bmatrix} 2(X_{\delta_r} \delta_r^2 + X_{\delta_s} \delta_s^2 + X_{\delta_b} \delta_b^2)u + 2X_{uu}u + 2a_{1u} + b_{1u} \\ Y_v v + Y_r r + Y_p p + 2Y_{\delta_r} u \delta_r + Y_{r|\delta_s} r \delta_r \\ 2Z_u u + (Z_w + Z_{|w|s_w})w + z_q q + Z_{q|\delta_s} q \delta_s \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial v} \equiv \begin{bmatrix} 2X_{vv}v + X_{vr}r \\ Y_v u + Y_{vw}w + Y_{vq}q + Y_{v|r|s_r} \frac{vr}{v_h} + Y_{v|v|R} \frac{2v^2 + w^2}{v_h} \\ 2Z_{vv}v + Z_{vr}r + Z_{vp}p + Z_{w|q|s_w} \frac{vq}{v_h} + Z_{ww} \frac{vw}{v_h} \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial w} \equiv \begin{bmatrix} 2X_{ww}w + X_{wq}q \\ Y_{vw}v + Y_{vp}p + Y_{wr}r + Y_{v|r|s_r} \frac{wr}{v_h} + Y_{v|v|R} \frac{vw}{v_h} \\ (Z_w + Z_{|w|s_w})u + Z_{w|q|s_w} \frac{wq}{v_h} + Z_{ww} \frac{v^2 + 2w^2}{v_h} \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial p} \equiv \begin{bmatrix} X_{rp}r \\ 2Y_{p|p|s_p}p + Y_{pq}q + Y_p u + Y_{pw}w \\ 2Z_{pp}p + Z_{rp}r + Z_{vp}v \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial q} \equiv \begin{bmatrix} X_{wq}w + 2X_{qq}q \\ Y_{pq}p + Y_{qr}r + Y_{vq}v \\ Z_q u + Z_{q|\delta_s} u \delta_s \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{F}}^B}{\partial r} \equiv \begin{bmatrix} 2X_{rr}r + X_{rp}p + X_{vr}v \\ Y_r u + Y_{qr}q + Y_{wr}w + Y_{v|r|s_r} v_h + Y_{r|\delta_s} u \delta_r \\ 2Z_{rr}r + Z_{rp}p + Z_{vr}v + Z_{w|q|s_w} v_h \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial u} \equiv \begin{bmatrix} 2K_u u + K_v v + K_p p + K_r r + 2K_{\delta_r} u \delta_r \\ 2M_u u + (M_w + M_{|w|s_w})w + M_q q + M_{|q|\delta_s} q \delta_s + 2M_{\delta_s} u \delta_s + 2M_{\delta_b} u \delta_b \\ 2N_u u + N_v v + N_r r + N_p p + 2N_{\delta_r} u \delta_r \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial v} \equiv \begin{bmatrix} K_v u + K_{v_w} w + K_{v_q} q + K_{v|v|} \frac{2v^2 + w^2}{v_h} \\ 2M_{v_v} v + M_{v_r} r + M_{|w|q} \frac{vq}{v_h} + (M_{w|w|R} + M_{w|w|s_w}) \frac{vw}{v_h} + M_{v_p} p \\ N_v u + N_{v_w} w + N_{|v|r} \frac{vr}{v_h} + N_{|v|R} \frac{2v^2 + w^2}{v_h} + N_{v_q} q \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial w} \equiv \begin{bmatrix} K_{v_w} v + K_{\phi} p + K_{w_r} r + K_{v|v|} \frac{vw}{v_h} \\ (M_w + M_{w|s_w})u + M_{w|q} \frac{wq}{v_h} + (M_w + M_{w|s_w}) \frac{v^2 + 2w^2}{v_h} \\ N_{v_w} v + N_{w_p} p + N_{w_r} r + N_{|v|r} \frac{wr}{v_h} + N_{|v|R} \frac{vw}{v_h} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial p} \equiv \begin{bmatrix} 2K_{p|p|s_p} p + K_p u + K_{p_q} q + K_{\phi} w \\ 2M_{p_p} p + M_{r_p} r + M_{v_p} v \\ N_{p_q} q + N_{\phi} w + N_p u \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial q} \equiv \begin{bmatrix} 2K_{q|q|s_q} q + K_q u + K_{q_r} r + K_{\phi} w \\ 2M_{q|q|s_q} q + M_{q|\delta_s} u \delta_s + M_q u + M_{w|q} v_h q \\ N_{p_q} p + N_{q_r} r + N_{v_q} v \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{M}}^B}{\partial r} \equiv \begin{bmatrix} K_r u + K_{q_r} q + K_{w_r} w \\ 2M_{r_r} r + M_{r_p} p + M_{v_r} v \\ N_r u + N_{q_r} q + N_{|v|r} v_h + 2N_{r|r|s_r} r + N_{w_r} w \end{bmatrix}$$

**감사의 글**

본 연구는 LIG넥스원의 지원 하에 이루어졌음 (계약번호: LIGNEX1-2015-11-0038)

**References**

[1] J. N. Sur and J. L. Choi, "Autonomy levels and trends of unmanned underwater vehicle", The Magazine of the IEIE, 2011, pp. 20-29

[2] D. H. Titterton and J. L. Weston, Strapdown inertial navigation technology. 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, 2004

[3] J. C. Kinsey, M. E. Ryan, L.W. Louis, "A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and New Challenges," IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft. 2006

[4] J. J. Leonard, et. al. "Autonomous Underwater Vehicle Navigation," IEEE ICRA Workshop on Navigation of

Outdoor Autonomous Vehicles, 1998

[5] C.-M. Lee, P.-M. Lee, S.-W. Hong, and S.-M. Kim, "Underwater Navigation System based on Inertial Sensor and Doppler Velocity Log using Indirect Feedback Kalman Filter," International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2005

[6] Y.-G. Park, C. Kang, D.-H. Lee, C.-G. Park, "Reduced Error Model for Integrated Navigation of Unmanned Autonomous Underwater Vehicle." Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2014, pp. 584-591

[7] M. Koifman, I. Y. Bar-Itzhack, "Inertial Navigation System Aided by Aircraft Dynamics," IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, pp. 487-493

[8] Ø. Hegrenæs and O. Hallingstad, "Model Aided Inertial Navigation for Underwater Vehicles, Model-Aided INS with Sea Current Estimation for Robust Underwater Navigation," IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, pp. 316-337

[9] M. Gertler and G. R. Hagen, "Standard Equations of Motion for Submarine Simulation", No. NSRDC-2510. David W Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda MD, 1967

**저 자 소 개**



**이 윤 하 (Yunha Lee)**

2015년 한동대학교 기계제어공학부(공학사). 현재 동 대학원 기계제어공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 상태추정이론, 복합항법, 유도조종기법 등.



**나 원 상 (Won-Sang Ra)**

1998년 연세대학교 전기공학과(공학사). 2000년 동 대학원 전기컴퓨터공학과(공학석사). 2009년 동 대학원 전기전자공학과(공학박사). 2000년 3월~2009년 2월 국방과학연구소 유도조종부 선임연구원. 2009년~현재 한동대학교 기계제어공학부 부교수. 관심분야는 강인 상태추정이론, 표적추적 필터, 유도조종기법 등.



**김 광 훈 (Kwanghoon Kim)**

2006년 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학박사). 2014년 10월~현재 LIG넥스원 수석연구원. 관심분야는 관성항법, 복합항법, 칼만필터링, 고장검출 등.



**안 명 환 (Myonghwan Ahn)**

2012년 연세대학교 전기전자공학과(공학석사). 2000년~현재 LIG넥스원 수석연구원. 관심분야는 전투체계, 표적추적, 소나, 통신, 네트워크 등.



**이 범 직 (Bum-Jik Lee)**

2004년 연세대학교 전기전자공학과(공학박사). 2013년~현재 대우조선해양 차장. 관심분야는 전투체계, 표적추적 및 정보융합, 소나, 복합항법 등.