

DVL 유실 전 기동 전략이 INS/DVL 복합항법 성능에 미치는 영향 분석

현철^{1†}, 김현승², 이성균¹, 고진용¹

Effect of Pre-Outage Maneuver Strategies on INS/DVL Integrated Navigation Performance Under DVL Loss

Chul Hyun^{1†} , Hyunseung Kim² , Sungkyun Lee¹ , Jinyong Go¹ 

¹Principal Researcher, M&S team, LIG Defense&Aerospace, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, Korea

²Senior Researcher, M&S team, LIG Defense&Aerospace, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, Korea

ABSTRACT

This study analyzes the effect of pre-outage maneuver strategies on Inertial Navigation System (INS) / Doppler Velocity Log (DVL) integrated navigation performance under DVL-loss conditions. Maneuvering motion can improve the excitation of navigation error states and parameter estimation performance in integrated navigation systems. However, improved parameter estimation does not necessarily translate into enhanced navigation accuracy during the subsequent dead-reckoning phase under realistic underwater operating conditions. Three representative maneuver patterns, namely straight, zigzag, and single-turn trajectories, are comparatively evaluated under identical operating conditions through Monte Carlo simulations using a horizontal-plane 3-DOF INS/DVL framework that estimates DVL yaw misalignment and yaw-rate gyro bias. A phase-wise evaluation framework is adopted to separately quantify state estimation gains during the maneuver phase and error propagation behavior during the DVL-outage phase. The results show that maneuvering patterns with heading changes improve DVL yaw misalignment estimation, while they can also increase maneuver-induced position-error cost. In particular, the single-turn maneuver shows DVL yaw misalignment estimation improvement comparable to the zigzag maneuver, but its post-outage navigation benefit remains limited. These findings indicate that pre-outage maneuver strategies should not be evaluated solely by estimation-error reduction. Instead, maneuver strategy design for INS/DVL navigation under DVL-loss conditions requires a cost-benefit perspective that jointly considers estimation improvement, maneuver-induced position-error cost, and post-outage navigation benefit.

Keywords: INS/DVL integrated navigation, DVL outage, underwater navigation, maneuver strategy, state estimation, Extended Kalman Filter

주요어: 관성항법/DVL 통합항법, DVL 유실 구간, 수중항법, 기동 기반 항법 전략, 상태 추정, 확장 칼만 필터

1. 서론

수중운동체의 자율 운용 성능은 항법 시스템의 정확성과 안정성에 크게 의존한다. 수중 환경에서는 위성항법 신호를 지속적으로 사용할 수 없기 때문에, 관성항법장치(Inertial Navigation System, INS)를 중심으로 한 추측항법이 기본적으로 활용된다.

그러나 INS는 시간에 따라 오차가 누적되는 특성을 가지므로, 장시간 수중 운용을 위해서는 외부 보조항법 정보와의 결합이 필수적이다. 이와 같은 이유로 도플러 속도계(Doppler Velocity Log, DVL)는 수중운동체 항법에서 널리 사용되는 대표적인 보조 센서이다 (Paull et al. 2014, Zhang et al. 2023).

INS/DVL 복합항법은 DVL에서 제공하는 대지 또는 대수 속도

Received May 12, 2026 Revised Jun 03, 2026 Accepted Jun 10, 2026

[†]Corresponding Author E-mail: chul.hyun@gmail.com



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정보를 이용하여 INS의 속도 및 위치 오차를 보정할 수 있다는 장점이 있다. 특히 해저면 기준 속도 측정이 가능한 조건에서는 수중운동체의 위치 오차 발산을 효과적으로 억제할 수 있다. 그러나 실제 운용 환경에서는 해저 지형, 운용 심도, 빔 반사 조건, 기동 자세, 센서 음영 등 다양한 요인에 의해 DVL 측정값이 일시적으로 유실될 수 있다. 이러한 DVL 유실 구간에서는 INS 단독 추측항법에 대한 의존도가 증가하며, 유실 이전의 항법 상태와 오차 추정 정확도가 이후 위치오차 성장에 직접적인 영향을 미친다 (Jalving et al. 2004, Tal et al. 2017, Klein et al. 2022).

수중 복합항법에서는 센서 오차, 장착 오차, 관성센서 바이어스와 같은 오차 상태를 효과적으로 추정하는 것이 중요하다. 특히 DVL misalignment와 척도계수는 DVL 속도 측정값의 좌표 변환 및 INS 보정 성능에 직접적인 영향을 줄 수 있으며, 이에 따라 INS/DVL 시스템의 정렬 및 보정 문제는 수중항법 분야에서 중요한 연구 주제로 다루어져 왔다 (Kinsey & Whitcomb 2007, Pan & Wu 2016, Wang et al. 2021, Li et al. 2022). 이를 위해 기동을 통해 항법 오차 상태의 가관측성을 향상시키는 접근도 널리 고려되어 왔다. 일반적으로 직선 주행보다 방향 전환이나 곡선 기동이 포함된 주행에서는 방위각 관련 오차 상태와 센서 정렬 오차가 보다 잘 여기될 수 있으며, 이에 따라 필터 기반 추정 성능이 개선될 가능성이 있다 (Klein & Diamant 2015, 2018, Frutuoso et al. 2022). 이러한 관점에서 기동은 단순한 경로 형성이 아니라, 항법 오차 상태를 추정하기 위한 중요한 운용 요소로 해석될 수 있다.

그러나 DVL 유실을 포함하는 실제 운용 시나리오에서는 기동에 의한 가관측성 향상이 곧바로 최종 항법 성능 향상으로 이어진다고 단정하기 어렵다. 기동은 오차 상태의 추정 가능성을 높이는 동시에, 자세 오차와 방위각 오차가 위치오차로 전파되는 경로를 변화시킨다. 또한 DVL 유실 이후에는 외부 속도 보정이 제한되므로, 유실 직전의 위치오차, 추정 잔차, 기동에 따른 오차 전파 특성이 이후 추측항법 성능을 결정하는 주요 요인으로 작용할 수 있다. 기존 DVL 유실 관련 연구들은 주로 유실 이후의 속도 추정, 결측 빔 보상, 또는 데이터 기반 보정 기법에 초점을 두어 왔으나, DVL 유실 이전의 기동이 오차상태 추정과 이후 추측항법 오차 성장에 미치는 영향을 함께 분석한 연구는 상대적으로 제한적이다 (Li et al. 2020, Yona & Klein 2021, Cohen & Klein 2022, Klein et al. 2022).

이 연구에서는 DVL 유실 전 기동 전략이 INS/DVL 복합항법 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 직선, 지그재그, 단일 선회 기동의 세 가지 대표 기동 패턴을 설정하고, 동일한 운용 조건에서 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행한다. INS/DVL 복합항법 필터는 DVL yaw misalignment와 gyro bias를 포함한 오차 상태를 추정하도록 구성하며, 각 기동 패턴에 따른 추정 수렴 특성과 DVL 유실 이후 위치오차 성장 특성을 비교한다. 특히 이 연구는 기동 단계에서의 오차 상태 추정 성능과 DVL 유실 단계에서의 항법 오차 전파를 구분하여 분석함으로써, 기동 기반 가관측성 향상과 실제 항법 성능 사이의 관계를 검토한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 INS/DVL 복합항법 모델과 추정 필터의 구성을 설명한다. 3장에서는 DVL 유실 전 기동 시나리오와 분석 지표를 정의한다. 4장에서는 기동 패턴별

Monte Carlo 시뮬레이션 결과를 비교하고, 추정 성능과 위치오차 성장 특성의 관계를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 연구 결과를 요약하고, DVL 유실 환경에서의 기동 전략 설계 방향을 논의한다.

2. INS/DVL 복합항법 모델

이번 장에서는 DVL 유실 전 기동 전략의 영향을 분석하기 위해 사용한 INS/DVL 복합항법 모델을 정리한다. 이 연구의 목적은 정밀한 센서 오차 모델 자체를 새로 제안하는 것이 아니라, 기동 형태에 따른 추정 성능과 DVL 유실 이후 오차 전파 특성을 비교하는 데 있다. 따라서 항법 시스템은 수중운동체의 일반적인 INS/DVL 복합항법 구조를 기반으로 구성하였으며, DVL yaw misalignment와 gyro bias를 주요 추정 대상으로 설정하였다.

2.1 좌표계 및 항법 상태

수중운동체의 운동은 항체좌표계(body frame)와 항법좌표계(navigation frame)를 기준으로 표현한다. 항체좌표계는 수중운동체에 고정된 좌표계이며, 항법좌표계는 지역 수평 좌표계로 정의한다. 이 연구는 DVL 유실 전 침로 변화가 방위각 관련 오차 상태 추정과 DVL 유실 이후 위치오차 전파에 미치는 영향을 분석하는 데 목적이 있으므로, 수평면 3자유도 운동을 대상으로 항법 모델을 구성하였다.

이에 따라 이 연구에서 고려하는 항법 상태는 수평면 위치, 수평면 속도, yaw 자세각 및 yaw-rate gyro bias를 중심으로 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{nav}(t) = [\mathbf{p}_h^n \quad \mathbf{v}_h^n \quad \psi \quad b_r]^T \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{p}_h^n$ 은 항법좌표계에서의 수평면 위치, $\mathbf{v}_h^n$ 은 항법좌표계에서의 수평면 속도, ψ 는 yaw 자세각, b_r 은 yaw-rate gyro bias를 의미한다. 이 연구에서는 roll, pitch 및 수직방향 운동을 명시적으로 고려하지 않고, DVL 속도 측정과 직접적으로 연관되는 yaw 방향 오차, yaw-rate gyro bias 및 DVL yaw misalignment 추정 특성에 초점을 둔다.

INS 단독 항법에서는 관성센서 오차가 시간에 따라 적분되므로 속도 및 위치 오차가 점차 증가한다. DVL 측정값이 유효한 구간에서는 DVL 속도 정보를 이용하여 INS 오차를 보정할 수 있지만, DVL 유실 구간에서는 이러한 보정이 제한되므로 유실 직전의 추정 상태가 이후 항법 성능에 중요한 영향을 미친다.

2.2 DVL 속도 측정 모델

DVL은 수중운동체의 속도를 항체좌표계 또는 센서좌표계 기준으로 측정한다. 이상적인 경우 DVL에서 측정된 속도는 항체좌표계 속도와 일치하지만, 실제 시스템에서는 DVL 장착 오차, 센서 정렬 오차, 스케일 팩터 오차 등이 존재할 수 있다. 이 연구에서는 수평면 3자유도 운동을 대상으로 하므로, DVL 속도 측정 모델은 수평면 속도 성분과 yaw misalignment를 중심으로 구성하

였다.

DVL 좌표계에서 측정된 수평면 속도는 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_{DVL} \\ v_{DVL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{DVL} & \sin \alpha_{DVL} \\ -\sin \alpha_{DVL} & \cos \alpha_{DVL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_u \\ n_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 u 와 v 는 각각 항체좌표계에서의 전후방 및 좌우방향 수평면 속도 성분이며, u_{DVL} 과 v_{DVL} 은 DVL 좌표계에서 측정된 대응 속도 성분을 의미한다. α_{DVL} 은 항체좌표계 대비 DVL 좌표계의 yaw 방향 misalignment이며, n_u 와 n_v 는 DVL 속도 측정 잡음이다.

DVL yaw misalignment가 작은 각도라고 가정하면, Eq. (2)는 Eq. (3)과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_{DVL} &\approx u + \alpha_{DVL} v + n_u \\ v_{DVL} &\approx v - \alpha_{DVL} u + n_v \end{aligned} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 확인할 수 있듯이, DVL yaw misalignment는 수평면 속도 성분의 교차 결합 형태로 측정 잔차에 반영된다. 따라서 항법 필터에서는 INS로부터 계산된 항체좌표계 속도와 DVL 측정 속도의 차이를 측정 잔차로 사용하며, 이 잔차를 통해 yaw 자세오차, DVL yaw misalignment 및 yaw-rate gyro bias와 같은 방위각 관련 오차 상태를 추정할 수 있다. 특히 침로 변화가 포함된 기동에서는 속도 방향과 yaw-rate가 변화하므로, DVL 속도 잔차에 포함된 방위각 관련 오차 성분이 보다 뚜렷하게 나타날 수 있다.

2.3 INS/DVL 복합항법 필터

이 연구에서는 INS와 DVL을 결합하기 위해 수평면 3자유도 운동을 대상으로 한 오차 상태 기반의 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 사용한다. 필터의 추정 상태는 수평면 위치 오차, 수평면 속도오차, yaw 자세오차, yaw-rate gyro bias 오차 및 DVL yaw misalignment를 중심으로 Eq. (4)와 같이 구성한다.

$$\delta \mathbf{x} = [\delta \mathbf{p}_h^n \quad \delta \mathbf{v}_h^n \quad \delta \psi \quad \delta b_r \quad \alpha_{DVL}]^T \quad (4)$$

여기서 $\delta \mathbf{p}_h^n$ 은 항법좌표계에서의 수평면 위치오차, $\delta \mathbf{v}_h^n$ 은 항법좌표계에서의 수평면 속도오차, $\delta \psi$ 는 yaw 자세오차, δb_r 은 yaw-rate gyro bias 오차, α_{DVL} 은 DVL yaw misalignment를 나타낸다. 이 연구는 DVL 유실 전 기동이 방위각 관련 오차 상태 추정과 수평면 위치오차 전파에 미치는 영향을 분석하는 데 목적이 있으므로, roll 및 pitch 방향 자세오차와 수직방향 운동은 필터 상태에 명시적으로 포함하지 않았다. 필터는 관성센서 기반 시간 전파 단계와 DVL 측정값을 이용한 보정 단계로 구성된다.

DVL 측정이 유효한 구간에서는 INS 예측 속도와 DVL 측정 속도 사이의 차이를 이용하여 필터를 갱신한다. 반면 DVL 유실 구간에서는 측정 갱신이 수행되지 않으며, INS 기반 시간 전파만으로 항법 상태가 계산된다. 따라서 DVL 유실 직전까지 추정된 α_{DVL} 과 δb_r 의 정확도, 그리고 그 시점의 수평면 위치 및 속도 오차가 유실 이후 항법오차 성장에 직접적으로 반영된다.

2.4 기동과 오차 상태 추정의 관계

INS/DVL 복합항법에서 기동은 오차 상태 추정 성능에 중요한 영향을 미친다. 직선 주행에서는 속도 방향과 yaw 자세 변화

가 제한적이기 때문에 방위각 관련 오차 상태가 충분히 여기되지 않을 수 있다. 반면 지그재그 또는 선회 기동과 같이 침로 변화가 포함된 경우에는 DVL 수평면 속도 잔차에 yaw 자세오차와 DVL yaw misalignment의 영향이 보다 뚜렷하게 나타날 수 있다.

특히 DVL yaw misalignment와 yaw-rate gyro bias는 항체좌표계 속도와 항법좌표계 속도 변환 과정에서 yaw 자세오차와 결합되어 나타난다. 따라서 침로 변화가 존재하는 기동에서는 해당 오차 상태의 식별 가능성이 향상될 수 있다. 그러나 이러한 추정 성능 향상이 반드시 DVL 유실 이후의 위치 정확도 향상으로 이어지는 것은 아니다. 기동 과정에서 발생한 위치오차, 추정 과도 현상, 그리고 유실 이후의 오차 전파 특성이 함께 작용하기 때문이다.

이에 따라 이 연구에서는 기동 단계에서의 추정 성능과 DVL 유실 단계에서의 위치오차 전파를 구분하여 평가한다. 이러한 phase-wise 분석을 통해 기동 기반 오차 상태 추정 효과와 실제 항법 성능 사이의 관계를 보다 명확히 검토하고자 한다.

3. 기동 시나리오 및 시뮬레이션 설정

이번 장에서는 DVL 유실 전 기동 전략에 따른 INS/DVL 복합항법 성능을 비교하기 위한 시뮬레이션 시나리오와 분석 지표를 설명한다. 이 연구는 특정 기동 제어기 자체의 성능을 검증하는 것이 아니라, 동일한 항법 환경에서 기동 형태에 따른 추정 성능과 DVL 유실 이후 오차 전파 특성의 차이를 비교하는 데 목적이 있다. 따라서 모든 기동 시나리오는 동일한 기본 운용 조건에서 수행되도록 구성하였다.

3.1 시뮬레이션 구성

시뮬레이션은 수평면 3자유도 수중운동체 운동 모델 기반으로 수행하였다. 운동 모델은 수중운동체의 수평면 병진 운동과 yaw 회전 운동을 포함하며, INS/DVL 복합항법 알고리즘과 연동하여 각 기동 패턴에 따른 항법 성능을 비교하였다. 다만 이 연구의 목적은 정밀한 6자유도 유체동역학 모델의 검증이 아니라, 동일 조건에서 기동 전략에 따른 상대적 항법 특성을 분석하는 데 있으므로, 운동 모델 및 제어기 구성은 비교 가능한 수준으로 단순화하여 적용하였다. 이에 따라 roll, pitch 및 수직방향 운동은 명시적으로 고려하지 않고, 침로 변화에 따른 yaw 방향 오차 상태 추정과 수평면 위치오차 전파 특성을 중심으로 분석하였다.

항법 시스템은 INS와 DVL로 구성되며, INS는 일정한 샘플링 주기로 yaw 자세각, 수평면 속도 및 수평면 위치를 계산한다. DVL은 수중운동체 수평면 속도를 측정하며, 정상 구간에서는 EKF 기반 복합항법 필터의 측정 갱신에 사용된다. DVL 측정에는 속도 측정 잡음과 DVL yaw misalignment 오차가 포함되며, 필터는 이를 추정 상태로 포함한다.

이 연구에서는 실제 수중 환경에서 발생할 수 있는 DVL 유실 상황을 모사하기 위해 사전에 정의한 DVL 유실 구간 동안 DVL 측정 갱신을 중단하였다. DVL 유실 구간에서는 INS 기반 시간 전파만 수행되며, 외부 속도 보정 없이 추측항법(dead-reckoning)

Table 1. Key simulation conditions for maneuver comparison.

Parameter	Symbol	Value
Motion model	-	Horizontal-plane 3-DOF
Maneuver interval	P_2	150-300 m
DVL outage interval	P_3	300-750 m
DVL yaw misalignment	α_{DVL}	2.0 deg
Yaw-rate gyro bias	b_r	0.010 deg/s with random walk
DVL velocity noise std.	σ_{DVL}	0.015 m/s
Monte Carlo runs	N_{MC}	100

이 수행된다. 따라서 DVL 유실 이전의 추정 상태와 기동 특성이 이후 위치오차 성장에 직접적인 영향을 미치게 된다.

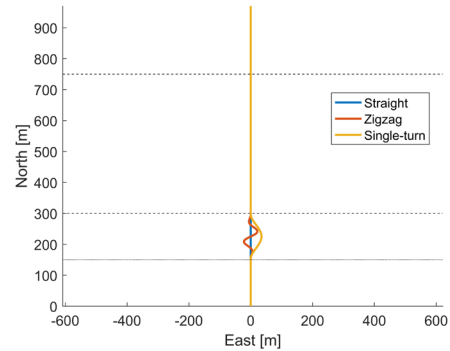
기동 전략별 통계적 특성을 비교하기 위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 각 Monte Carlo 반복에서는 관성센서 잡음, DVL 측정 잡음 및 yaw-rate gyro bias의 random-walk 성분을 독립적으로 생성하였으며, 초기 위치 · 속도 · heading 오차 조건은 모든 반복에서 동일하게 설정하였다. Table 1은 이 연구의 기동 전략 비교에 사용한 핵심 시뮬레이션 조건을 정리한 것이다. 모든 시나리오는 동일한 DVL yaw misalignment, yaw-rate gyro bias, DVL 속도 측정 잡음 및 DVL 유실 구간을 갖도록 설정하였으며, Phase 2 구간의 침로 변화 패턴만 다르게 구성하였다. 이를 통해 기동 형태에 따른 오차 상태 추정 성능과 DVL 유실 이후 위치오차 전파 특성의 차이를 비교하였다.

Table 1에서 Phase 2와 Phase 3의 구간은 시간 기준이 아니라 North 방향 진행거리를 기준으로 정의하였다. Phase 2는 DVL 측정이 유효한 상태에서 기동이 수행되는 구간이며, Phase 3는 DVL 측정 갱신이 중단된 추측항법 구간에 해당한다. Yaw-rate gyro bias는 초기 바이어스에 random-walk 성분이 포함된 형태로 모사하였다.

3.2 기동 시나리오

이 연구에서는 DVL 유실 전 기동 형태에 따른 항법 성능 차이를 비교하기 위해 세 가지 대표 기동 시나리오를 구성하였다. 모든 시나리오는 동일한 평균 속도, 동일한 전체 분석 구간 및 동일한 DVL 유실 구간을 갖도록 설정하였다. 또한 DVL 유실 시작 시점에서 nominal heading과 수평면 속도 조건이 동일하도록 구성하여, 단순 초기 조건 차이에 의한 영향을 최소화하였다. 모든 기동 시나리오는 Table 1의 공통 조건을 기반으로 하되, Phase 2 구간의 침로 변화 패턴만 다르게 설정하였다.

Fig. 1은 이 연구에서 사용한 기동 시나리오의 개념도이다. 첫 번째 시나리오는 직선 주행(straight maneuver)이다. 수중운동체는 일정한 침로를 유지하며 주행하며, 침로 변화가 거의 발생하지 않는다. 해당 시나리오는 최소 기동 조건에서의 항법 성능 기준(reference case)으로 사용된다. 두 번째 시나리오는 지그재그 기동(zigzag maneuver)이다. 수중운동체는 일정한 주기로 좌우 침로 변화를 반복하며 주행한다. 이 경우 침로 변화에 의해 방위각 관련 오차 상태가 지속적으로 여기되므로, DVL yaw misalignment 및 yaw-rate gyro bias 추정 성능 향상이 기대될 수 있다. 세 번째 시나리오는 단일 선회 기동(single-turn maneuver)이다. 수중운동체는 특정 시점에서 단일 방향 선회를 수행한 후 다시 직선 주행을 유지한다. 해당 시나리오는 지속적인 방향 변

**Fig. 1.** Phase-based maneuver trajectories.

화가 존재하는 지그재그 기동과 직선 주행 사이의 중간 형태로 구성하였다.

이 연구에서는 기동 단계와 DVL 유실 단계를 구분하여 분석하기 위해 전체 운용 구간을 다음과 같은 세 개의 phase로 구분하였다.

- Phase 1: 초기 안정 주행 구간
- Phase 2: 기동 수행 및 DVL 정상 측정 구간
- Phase 3: DVL 유실 이후 추측항법 구간

Phase 2에서는 침로 변화에 따른 yaw 방향 오차 상태 추정 성능을 분석하고, Phase 3에서는 DVL 유실 이후 수평면 위치오차 전파 특성을 비교한다.

3.3 성능 평가 지표

기동 전략에 따른 INS/DVL 복합항법 성능을 비교하기 위해 추정 성능과 위치오차 전파 특성을 각각 평가하였다.

우선 기동에 따른 오차 상태 추정 성능을 분석하기 위해 DVL yaw misalignment 추정 오차와 yaw-rate gyro bias 추정 오차를 비교하였다. 각 추정 상태의 수렴 특성은 Monte Carlo 평균과 표준편차를 기준으로 평가하였다. 또한 DVL 유실 이후 위치오차 특성을 분석하기 위해 다음 두 가지 지표를 사용하였다. 첫 번째 지표는 DVL 유실 종료 시점에서의 최종 위치오차(final position error)이다. 해당 지표는 전체 DVL 유실 구간 동안 누적된 수평면 위치오차의 크기를 나타낸다. 두 번째 지표는 DVL 유실 구간 동안의 위치오차 증가 특성(position error growth characteristic)이다. 이 연구에서는 DVL 유실 직전 위치오차와 유실 종료 시점 위치오차의 차이를 이용하여 위치오차 증가량을 계산하였으며, 이를 통해 단순 초기 오차 차이와 DVL 유실 이후 오차 전파 특성을 구분하여 분석하였다.

추가로, 기동 전략의 효과를 정량적으로 비교하기 위해 Phase 2 구간의 yaw-rate 기반 기동 여기 지표 $J_{r,p2}$, DVL yaw misalignment 추정오차 감소량 Δe_{α} , Phase 2 위치오차 증가량 ΔP_{p2} , 그리고 Phase 3 항법 성능 개선량 B_{p3} 를 정의하였다.

$J_{r,p2}$ 는 Phase 2 동안의 yaw-rate 이력을 기반으로 산출한 기동 여기 수준을 나타내며, 값이 클수록 침로 변화에 의한 방위각 관련 오차 상태의 여기 수준이 크다는 것을 의미한다. Δe_{α} 는 Phase 2 동안 DVL yaw misalignment 추정오차가 얼마나 감소하였는지

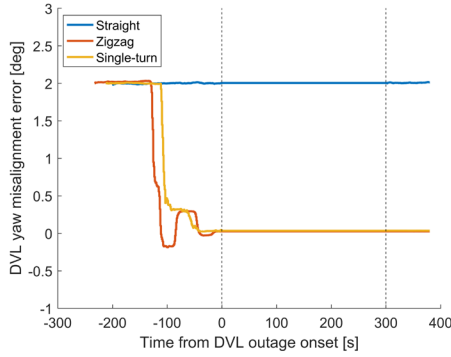


Fig. 2. DVL yaw misalignment estimation error.

를 나타내며, 양의 값은 추정오차가 감소했음을 의미한다. ΔP_{p2} 는 Phase 2 시작 시점과 종료 시점 사이에서 증가한 위치오차로 정의하였으며, 기동 수행 과정에서 발생하는 위치오차 비용으로 해석할 수 있다. B_{p3} 는 각 기동 시나리오에서 추정 오차 상태를 반영함으로써 DVL 유실 이후 Phase 3 위치오차 증가가 얼마나 완화되었는지를 나타내는 지표이며 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$B_{p3}^{(i)} = \Delta P_{p3,ref}^{(i)} - \Delta P_{p3,est}^{(i)} \quad (5)$$

여기서 i 는 각 기동 시나리오를 의미하며, $\Delta P_{p3,ref}^{(i)}$ 는 기준 조건에서의 Phase 3 위치오차 증가량, $\Delta P_{p3,est}^{(i)}$ 는 추정된 오차 상태를 반영한 경우의 Phase 3 위치오차 증가량을 나타낸다. 따라서 $B_{p3}^{(i)}$ 가 양수이면 추정 결과가 해당 시나리오의 Phase 3 위치오차 증가를 완화했음을 의미하며, 음수이면 해당 조건에서 추정 결과가 Phase 3 위치오차 전파 개선으로 이어지지 않았음을 의미한다.

이와 같은 phase-wise 분석을 통해 기동 기반 오차 상태 추정 효과와 DVL 유실 이후 항법 성능 사이의 관계를 비교·분석하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

이번 장에서는 DVL 유실 전 기동 전략에 따른 INS/DVL 복합 항법 성능 차이를 비교·분석한다. 우선 기동 단계에서의 오차 상태 추정 성능을 비교하고, 이후 DVL 유실 이후 구간에서의 위치오차 전파 특성을 분석한다. 모든 결과는 Monte Carlo 시뮬레이션 기반 평균값과 표준편차를 기준으로 정리하였다.

4.1 기동에 따른 오차 상태 추정 성능

Fig. 2는 각 기동 시나리오에서의 DVL yaw misalignment 추정 결과를 나타낸다. 직선 주행의 경우 yaw misalignment 추정값의 수렴 속도가 상대적으로 느리며, Monte Carlo 분산 또한 비교적 크게 나타난다. 이는 직선 주행에서는 침로 변화가 제한적이므로 방위각 관련 오차 상태가 충분히 여기되지 않기 때문이다.

반면 지그재그 기동에서는 침로 변화가 반복적으로 발생함에 따라 yaw misalignment 추정값이 보다 빠르게 수렴하는 경향을 보인다. 특히 추정 초기 구간에서 오차 감소 속도가 증가하며,

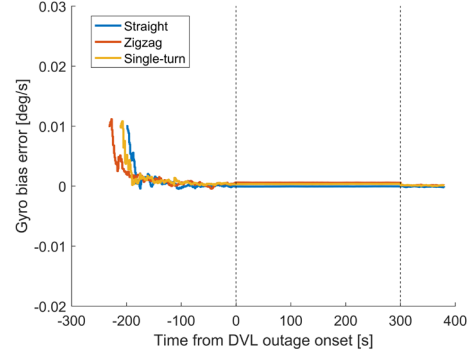


Fig. 3. Yaw-rate gyro bias estimation error.

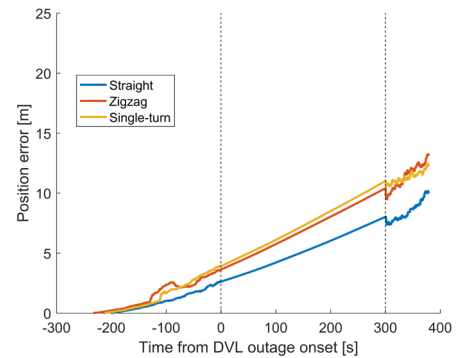


Fig. 4. Horizontal position error during DVL-denied navigation.

Monte Carlo 분산 또한 감소하는 특성이 확인된다. 이는 반복적인 침로 변화가 DVL 수평면 속도 잔차에 방위각 관련 오차의 영향을 보다 명확하게 반영하기 때문으로 해석할 수 있다.

단일 선회 기동은 직선 주행과 지그재그 기동 사이의 중간적인 특성을 보인다. 단일 선회 구간에서는 yaw misalignment 추정 성능이 일시적으로 향상되지만, 지속적인 방향 변화가 존재하는 지그재그 기동에 비해서는 추정 성능 개선 효과가 제한적으로 나타난다.

Fig. 3은 yaw-rate gyro bias 추정 결과를 나타낸다. 전체적으로 yaw misalignment 추정 결과와 유사한 경향이 관찰되며, 침로 변화가 포함된 기동에서 yaw-rate 바이어스 추정 수렴 속도가 향상되는 특성이 나타난다. 특히 지그재그 기동에서는 추정값의 평균 오차와 분산이 모두 감소하는 경향을 보인다.

이러한 결과는 기동이 방위각 관련 오차 상태의 식별 가능성을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 즉, 침로 변화가 포함된 기동은 INS/DVL 복합항법 필터의 yaw 관련 오차 상태 추정 성능 측면에서 유리하게 작용할 수 있다.

4.2 DVL 유실 이후 위치오차 특성

Fig. 4는 DVL 유실 이후 수평면 위치오차 변화를 나타낸다. DVL 유실 이전까지는 모든 시나리오에서 EKF 기반 측정 갱신이 수행되므로 위치오차가 제한적으로 유지된다. 그러나 DVL 유실

이후에는 INS 기반 추측방법만 수행되므로 위치오차가 점진적으로 증가하게 된다.

직선 주행의 경우 DVL yaw misalignment 추정 성능은 상대적으로 제한적이지만, DVL 유실 이후 위치오차 증가 특성은 비교적 안정적으로 나타난다. 반면 지그재그 기동은 오차 상태 추정 성능이 향상되었음에도 불구하고, DVL 유실 이후 위치오차 증가량이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보인다. 특히 일부 Monte Carlo 결과에서는 지그재그 기동이 직선 주행보다 더 빠른 위치오차 증가 특성을 보이는 경우가 확인된다. 이는 기동 기반 오차 상태 추정 성능 향상이 반드시 DVL 유실 이후의 위치 정확도 향상으로 직접 연결되지 않을 수 있음을 의미한다. 단일 선회 기동은 전체적으로 직선 주행과 지그재그 기동 사이의 추정 특성을 보였으나, 기동 중 위치오차 증가량은 지그재그 기동과 유사한 수준으로 나타났다.

다만 Fig. 4의 위치오차 변화는 DVL 유실 이후의 절대적인 오차 전파 특성을 나타내며, 이후 제시하는 B_{p3} 는 기준 조건 대비 추정 결과가 Phase 3 위치오차 증가를 얼마나 완화했는지를 나타내는 상대적 성능 지표로 구분하여 해석할 필요가 있다.

4.3 사전 기동 효과의 분리 해석

앞선 결과에서 사전 기동은 DVL yaw misalignment 및 yaw-rate gyro bias 추정성을 향상시킬 수 있으나, 동시에 경로 길이 증가와 Phase 2 위치오차 증가와 같은 기동 유발 비용을 동반함을 확인하였다. 사전 기동이 DVL 유실 후 항법 성능에 미치는 영향은 이 두 효과가 결합된 결과이므로, 이를 구분하여 살펴볼 필요가 있다.

이를 위해 기존의 misalignment 미추정 조건 및 EKF 기반 추정 조건에 더하여, controlled parameter compensation 조건을 비교하였다. 이 조건에서는 DVL yaw misalignment와 yaw-rate gyro bias를 참값으로 보정하여 해당 파라미터의 잔류 추정 오차 영향을 제거하였다. 단, 이 조건은 모든 항법오차가 제거된 최적 항법해가 아니라, 해당 파라미터의 잔류 추정 오차 영향을 제거했을 때 남는 기동 및 경로 조건의 영향을 비교하기 위한 통제 비교 조건이다. 따라서 이 조건이 EKF 기반 추정 조건보다 항상 낮은 오차를 보장하지는 않는다.

Fig. 5는 세 가지 추정 조건에서 기동 방식별 Phase 3 위치오차 증가량을 비교한 결과이며, 막대와 오차 막대는 각각 Monte Carlo 평균과 표준편차를 나타낸다. Table 2는 관련 수치를 정리한 것이다.

Straight 주행은 세 조건 간 Phase 3 위치오차 증가량의 차이가 거의 나타나지 않았으며, 이는 yaw-rate excitation이 부재하여 추정 조건 변화가 Phase 3 항법 성능에 영향을 주지 못했기 때문이다. Zigzag 기동은 misalignment 미추정 조건에서 28.587 m였던 Phase 3 위치오차 증가량이 EKF 기반 추정 조건에서 7.034 m로 크게 감소하였으며, controlled parameter compensation 조건(7.112 m)과도 유사한 수준을 보였다. 이는 zigzag 기동에서 EKF 기반 추정이 주요 파라미터의 잔류 추정 오차를 충분히 줄여, 통제 보정 조건과 유사한 Phase 3 오차 수준을 보였음을 의미한다. 반면 Single-turn 기동은 EKF 기반 추정 조건(7.313 m)이

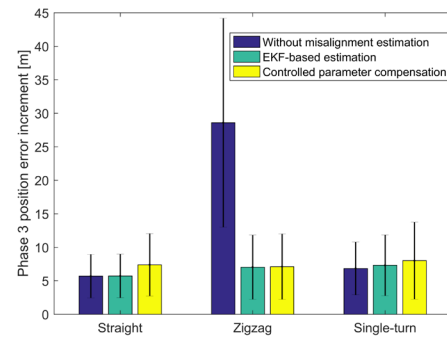


Fig. 5. Phase 3 position error increment under different estimation conditions.

Table 2. Phase 3 position error increment under different estimation conditions.

Maneuver	$\Delta P_{p3(unmod)}$ [m]	$\Delta P_{p3(est)}$ [m]	$\Delta P_{p3(comp)}$ [m]	B_{p3} [m]
Straight	5.697	5.730	7.384	-0.033
Zigzag	28.587	7.034	7.112	21.553
Single-turn	6.843	7.313	8.008	-0.470

Table 3. Maneuver excitation, estimation improvement, and maneuver cost by scenario.

Maneuver	$J_{r,p2}$ [-]	Δe_a [deg]	ΔP_{p2} [m]
Straight	0.000	-0.003	1.970
Zigzag	0.928	1.923	3.486
Single-turn	0.092	1.850	3.433

미추정 조건(6.842 m)보다 오히려 높게 나타났으며, controlled parameter compensation 조건(8.008 m)에서도 유사한 경향이 확인되었다. 이는 single-turn이 제공하는 일시적 여기 조건이 기동 유발 비용을 상쇄할 만큼 충분한 추정 이득으로 이어지지 않을 수 있음을 시사한다.

4.4 기동 전략의 추정 이득과 비용 관점 종합 분석

4.1절부터 4.3절까지의 결과를 종합하면, DVL 유실 전 사전 기동이 항법 성능에 미치는 영향은 추정 이득과 기동 유발 비용이 함께 작용하는 구조로 해석할 수 있다. Table 3은 기동 여기 수준, DVL yaw misalignment 추정오차 감소량, 기동 중 위치오차 증가량을 기동 시나리오별로 정리한 것이다.

$J_{r,p2}$ 는 지그재그 기동에서 0.928로 가장 크고, 단일 선회 기동에서 0.092, 직선 주행에서 0.000으로 나타났다. 반복적인 침로 변화를 포함하는 지그재그 기동이 Phase 2 동안 가장 큰 yaw-rate excitation을 제공하며, 이는 DVL 수평면 속도 잔차에 방위각 관련 오차 성분을 보다 명확하게 반영시켜 추정 성능 향상에 유리하게 작용한다.

DVL yaw misalignment 추정오차 감소량 Δe_a 는 지그재그 기동(1.923 deg)과 단일 선회 기동(1.850 deg) 모두에서 크게 나타났으며, 직선 주행(-0.003 deg)에서는 거의 개선되지 않았다. 즉, 침로 변화가 포함된 기동은 DVL yaw misalignment 추정 측면에서 유사한 수준의 개선 효과를 보인다.

그러나 Phase 2 위치오차 증가량 ΔP_{p2} 는 지그재그(3.486 m)와

단일 선회(3.433 m)가 직선 주행(1.970 m)보다 크게 나타나, 침로 변화 기동이 추정성 향상과 동시에 기동 유발 위치오차 비용을 수반함을 확인할 수 있다.

4.3절의 분리 해석 결과와 함께 보면, Δe_a 수준이 유사함에도 불구하고 두 기동의 Phase 3 항법 성능이 크게 다르게 나타나는 이유가 보다 명확해진다. 지그재그 기동은 반복적 침로 변화를 통해 추정에 필요한 여기 조건을 지속적으로 제공할 수 있으므로, 추정 이득이 기동 비용을 상회한 것으로 해석된다. 반면 단일 선회 기동은 일시적인 여기 조건을 제공하지만 그 지속성이 제한될 수 있으며, 이로 인해 유사한 수준의 기동 비용에도 불구하고 Phase 3 항법 성능 개선으로 이어지지 않은 것으로 판단된다.

따라서 DVL 유실 환경에서의 기동 전략은 추정오차 감소량이나 기동 강도만으로 평가하기 어려우며, 추정 이득과 기동 유발 비용의 균형을 함께 고려하는 cost-benefit 관점에서 설계되어야 한다.

5. 결론

이 연구에서는 DVL 유실 전 기동 전략이 INS/DVL 복합항법 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 직선 주행, 지그재그 기동 및 단일 선회 기동의 세 가지 대표 기동 시나리오를 구성하고, 동일한 운용 조건에서 Monte Carlo 기반 시뮬레이션을 수행하였다. INS/DVL 복합항법 필터는 DVL yaw misalignment와 yaw-rate gyro bias를 포함한 오차 상태를 추정하도록 구성하였으며, 기동 단계에서의 추정 성능과 DVL 유실 이후 수평면 위치오차 전파 특성을 구분하여 비교·분석하였다.

시뮬레이션 결과, 침로 변화가 포함된 기동은 방위각 관련 오차 상태의 식별 가능성을 향상시키며, 특히 지그재그 기동에서 DVL yaw misalignment 및 yaw-rate gyro bias 추정 성능이 상대적으로 향상되는 경향이 확인되었다. 이는 반복적인 침로 변화가 DVL 수평면 속도 잔차에 방위각 관련 오차의 영향을 보다 명확하게 반영하기 때문으로 해석할 수 있다.

그러나 기동에 따른 추정 성능 향상과 DVL 유실 이후 항법 성능 개선 사이에는 단순한 일대일 관계가 나타나지 않았다. 단일 선회 기동의 경우 DVL yaw misalignment 추정오차는 지그재그 기동과 유사한 수준으로 감소하였으나, DVL 유실 이후 위치오차 전파 완화 효과는 제한적으로 나타났다. 이는 특정 오차 상태의 추정 정확도뿐 아니라, 기동 중 형성된 수평면 위치오차, 추정 과도 현상, 유실 직전의 항법 상태 및 이후 오차 전파 특성이 함께 DVL 유실 이후 항법 성능을 결정함을 의미한다.

추정 이득과 기동 유발 비용의 분리 해석 결과, 지그재그 기동은 반복적 침로 변화를 통해 추정에 필요한 여기 조건을 지속적으로 제공함으로써 추정 이득이 기동 비용을 상회하는 것으로 나타났다. 반면 단일 선회 기동은 유사한 수준의 기동 비용에도 불구하고 추정 이득이 DVL 유실 이후 항법 성능 개선으로 충분히 전환되지 않을 수 있음을 확인하였다. 이는 사전 기동 전략의 효과가 추정오차 감소량이나 기동 강도만으로는 판단하기 어려우며, 추정 이득과 기동 유발 비용의 균형을 함께 고려하는 관점에서 평가되어야 함을 시사한다.

따라서 DVL 유실 환경에서의 기동 전략 설계 시에는 단순한 오차 상태 추정 성능뿐 아니라, 기동 수행 과정에서 발생하는 위치오차 비용과 DVL 유실 이후 항법 이득을 함께 고려할 필요가 있다. 이 연구 결과는 INS/DVL 복합항법 시스템에서 기동 기반 추정 개선과 실제 항법 성능 사이의 관계를 cost-benefit 관점에서 평가할 필요가 있음을 보여준다.

이 연구에서는 제한된 기동 시나리오와 특정 센서 오차 조건을 기반으로 분석을 수행하였다. 향후에는 다양한 DVL 유실 시간, 기동 강도 및 센서 오차 조건을 포함한 추가 분석을 통해 기동 전략과 항법 성능 사이의 관계를 보다 정량적으로 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 3차원 운동 및 6자유도 동역학 조건으로의 확장, 적응형 기동 전략, 그리고 다양한 필터 구조를 포함한 후속 연구를 통해 DVL 유실 환경에서의 항법 강건성 향상 가능성을 추가적으로 검토할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 지그재그 기동의 주기·진폭, 단일 선회의 선회를 및 지속시간 등 세부 기동 파라미터에 대한 민감도 분석을 통해 사전 기동 설계 기준을 보다 구체화하는 것도 향후 연구 과제로 남는다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, C.H.; methodology, C.H. and H.K.; software, C.H. and H.K.; validation, C.H., H.K., S.L., and J.G.; formal analysis, C.H.; investigation, C.H. and H.K.; resources, S.L. and J.G.; data curation, C.H.; writing—original draft preparation, C.H.; writing—review and editing, C.H., H.K., S.L., and J.G.; visualization, C.H. and H.K.; supervision, C.H.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Cohen, N. & Klein, I. 2022, BeamsNet: A data-driven approach enhancing Doppler velocity log measurements for autonomous underwater vehicle navigation, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 105216. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105216>
- Frutuoso, A., Silva, F. O., & de Barros, E. A. 2022, Influence of integration schemes and maneuvers on the initial alignment and calibration of AUVs: observability and degree of observability analyses, *Sensors*, 22, 3287. <https://doi.org/10.3390/s22093287>
- Jalving, B., Gade, K., Svartveit, K., Willumsen, A., & Sørhagen, R. 2004, DVL velocity aiding in the HUGIN 1000 integrated inertial navigation system, *Modeling*,

Identification and Control, 25, 223-236. <https://doi.org/10.4173/mic.2004.4.2>

- Kinsey, J. C. & Whitcomb, L. L. 2007, In situ alignment calibration of attitude and Doppler sensors for precision underwater vehicle navigation: theory and experiment, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32, 286-299. <https://doi.org/10.1109/JOE.2007.893686>
- Klein, I. & Diamant, R. 2015, Observability analysis of DVL/PS aided INS for a maneuvering AUV, *Sensors*, 15, 26818-26837. <https://doi.org/10.3390/s151026818>
- Klein, I. & Diamant, R. 2018, Observability analysis of heading aided INS for a maneuvering AUV, *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 65, 73-82. <https://doi.org/10.1002/navi.222>
- Klein, I., Gutnik, Y., & Lipman, Y. 2022, Estimating DVL velocity in complete beam measurement outage scenarios, *IEEE Sensors Journal*, 22, 20730-20737. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3206310>
- Li, D., Xu, J., Zhu, B., & He, H. 2022, A calibration method of DVL in integrated navigation system based on particle swarm optimization, *Measurement*, 187, 110325. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110325>
- Li, W., Chen, M., Zhang, C., Zhang, L., & Chen, R. 2020, A novel neural network-based SINS/DVL integrated navigation approach to deal with DVL malfunction for underwater vehicles, *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2891572. <https://doi.org/10.1155/2020/2891572>
- Pan, X. & Wu, Y. 2016, Underwater Doppler navigation with self-calibration, *The Journal of Navigation*, 69, 295-312. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000703>
- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., & Li, H. 2014, AUV navigation and localization: A review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39, 131-149. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278891>
- Tal, A., Klein, I., & Katz, R. 2017, Inertial navigation system/Doppler velocity log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements, *Sensors*, 17, 415. <https://doi.org/10.3390/s17020415>
- Wang, B., Liu, J., Deng, Z., & Fu, M. 2021, A model-free calibration method of inertial navigation system and Doppler sensors, *IEEE Sensors Journal*, 21, 2219-2229. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3015845>
- Yona, M. & Klein, I. 2021, Compensating for partial Doppler velocity log outages by using deep-learning approaches, In *IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments, ROSE 2021 - Proceedings*, pp.1-5. <https://doi.org/10.1109/ROSE52750.2021.9611779>
- Zhang, B., Ji, D., Liu, S., Zhu, X., & Xu, W. 2023, Autonomous Underwater Vehicle navigation: A review, *Ocean Engineering*, 273, 113861. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113861>

[j.oceaneng.2023.113861](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113861)



Chul Hyun is a principal researcher at LIG Defense&Aerospace in the Republic of Korea. He received the B.S. degree in 2001 and the Ph.D. degree in 2011 from the Department of Electrical and Computer Engineering at Seoul National University, where he conducted research on navigation, guidance, and control systems. Since joining LIG Defense&Aerospace in February 2011, he has been involved in R&D on GNC and modeling and simulation for underwater vehicles, as well as optical observation and tracking systems for space applications. His expertise also includes model-based system design, analysis, and performance evaluation.



Hyunseung Kim is a senior researcher at LIG Defense&Aerospace in the Republic of Korea. She received the B.S. degree in 2013 and the M.S. degree in 2016 from the Department of Aerospace Engineering at Inha University. She conducted research on satellite navigation systems and missile guidance in the ACSL Laboratory at Inha University. Since joining LIG Defense &Aerospace in January 2016, she has been engaged in research on guidance, control, modeling and simulation, and deep learning algorithms.



Sungkyun Lee is a principal researcher at LIG Defense&Aerospace in the Republic of Korea. He received the B.S. degree in 2007 and the Ph.D. degree in 2013 from the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering at Seoul National University. He conducted research on fluid dynamics and ship controllability at Seoul National University. Since joining LIG Defense&Aerospace in August 2016, he has been involved in research on fluid dynamics, model experiments, and modeling and simulation.



Jinyong Go is a principal researcher at LIG Defense&Aerospace in the Republic of Korea. He received the B.S. degree in 2010 and the M.S. degree in 2012 from the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering at Seoul National University. Since joining LIG Defense&Aerospace in 2012, he has worked on modeling and simulation, seakeeping analysis, and flight dynamics. His research interests include M&S, seakeeping,

flight dynamics, and performance analysis of naval and aerospace systems.

