

해상수직발사 환경에서의 유도탄 항법 정확도 분석

이용[†], 안태동, 흥현욱, 강성현, 김다애, 이수용

Analysis of Guided-Missile Navigation Accuracy under Initial Alignment Methods in Maritime Vertical-Launch Environments

Yong Lee[†] , Tae-dong Ahn , Hyunwook Hong , Seonghyeon Kang , Dayea Kim , Suyong Lee 

Navigation/Weapon Data Link R&D (inertial navigation), LIG Nex1, Seongnam Gyeonggi-do 13488, Korea

ABSTRACT

Guided weapon systems operating in maritime environments, such as the Vertical Launch System (VLS), form a core element of modern naval capabilities. Although vertical launch provides an advantage in confined spaces, the dynamic motion of the platform (ship) is directly transferred to the launch vehicle until just before launch, making navigation initialization challenging. Weapon systems deployed on offshore platforms are continuously affected by environmental disturbances such as waves, wind, and currents, as well as the ship's propulsion and steering. Consequently, assuming a stationary initial state when estimating the weapon's attitude using an Inertial Measurement Unit (IMU) introduces significant limitations. The process of determining this initial attitude, known as alignment, is critical in IMU-based navigation systems. Errors in initial attitude estimation directly propagate through the entire guidance phase. This leads to accumulated navigation errors and ultimately degrades missile accuracy. Although Global Navigation Satellite System (GNSS) updates can correct navigation solutions during the midcourse phase, IMU-based inertial navigation is indispensable during the early post-launch phase—before GNSS data become available. Moreover, GNSS corrections may be unavailable in jamming or spoofing environments. It is therefore important to accurately determine the initial attitude and rapid transition to inertial navigation mode to ensure the required guidance performance of ship-launched missiles. This study compares and analyzes three representative alignment methods applicable to maritime environments: one-shot alignment, one-shot mixed alignment, and shipboard transfer alignment, under identical sea conditions. To quantitatively reflect the dynamic nature of the marine environment, simulation data based on wave conditions were generated using the Marine System Simulator (MSS). The initial alignment accuracy of each method was evaluated using these data, and the subsequent inertial navigation performance was analyzed. From the obtained results, one-shot mixed alignment, which utilizes missile-mounted IMU acceleration data, exhibited large alignment errors due to hull motion effects, while transfer alignment using attitude and velocity data from the Master Inertial Navigation System (MINS) achieved higher accuracy. It was confirmed that in high sea state conditions, the transfer alignment method utilizing continuous velocity and attitude information from the MINS provided the highest performance in estimating the missile's attitude.

Keywords: one-shot alignment, one-shot mixed alignment, transfer alignment, inertial navigation

주요어: 원샷정렬, 원샷혼합정렬, 전달정렬, 관성항법

Received Nov 11, 2025 Revised Nov 25, 2025 Accepted Dec 05, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: yong.lee@lignex1.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.

1. 서론

해양 환경에서 운용되는 수직발사(Vertical Launch System, VLS)를 탑재한 무기체계는 현대 해군의 핵심 전력으로 자리잡고 있다. 특히 수직 발사는 제한된 공간에서 활용될 수 있다는 장점이 있지만, 발사 직전까지 플랫폼(함정)의 동적 운동이 발사체에 그대로 반영되어 항법 초기화에 어려움이 있다. 해상 플랫폼에서 운용되는 무기체계는 파랑, 바람, 조류 등 환경적인 요인과 선체 자체의 추진 및 조향 등 운용에 따른 지속적인 운동에 영향을 받는다. 따라서 유도무기 시스템의 초기 상태를 정지라는 가정하에 관성항법장치(Inertial Measurement Unit, IMU)를 활용하여 초기 자세를 추정하는데 어려움이 있다. 초기자세를 결정하는 과정을 정렬이라 하며, 이는 관성항법장치를 사용하는 항법시스템에서 매우 중요한 역할을 한다 (Britting 1971, Salychev 1998, Rogers 2003, Titterton & Weston 2004). 특히 초기 자세 오차는 유도 구간 전체에 걸쳐 항법 오차에 그대로 영향을 미치며, 사거리가 길어짐에 따라 빠르게 누적되어 최종적인 유도탄의 정확도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 중기유도 구간에서 Global Navigation Satellite System (GNSS)에 기반한 항법해 오차 보정은 가능하나, 발사 직후 GNSS 기반의 항법해가 확보되기 전 초기 단계에는 IMU 기반의 관성항법에 의존할 수밖에 없다. 또한 전파교란(jamming) 및 스킵핑(spoofing) 상황에서는 GNSS 보정 자체가 불가능해질 수 있기 때문에, 가능한 한 초기 자세를 정확하게 결정하고 관성항법 모드에 진입시키는 것이 유도탄의 항법성능 확보를 위한 필수 조건이다.

이에 본 연구에서는 해양 환경에서 적용 가능한 대표적인 초기 자세 결정 기법인 원샷 정렬(one-shot alignment), 원샷 혼합 정렬(one-shot mixed alignment), 속도/자세 정합 기반의 전달정렬(transfer alignment)을 동일한 해상 조건 하에서 비교 · 분석하였다. 특히 해양 환경의 동적 특성을 정량적으로 반영하기 위해 Marine System Simulator (MSS)를 활용하여 파랑 조건 기반의 시뮬레이션 데이터를 생성하였다. 생성된 시뮬레이션을 활용하여 각 정렬 방식에 따른 초기 정렬 정확도를 산출하고, 이를 초기 조건으로 하는 관성 항법을 수행했을 때 항법 정확도를 산출하였다. 그 결과, 유도탄 내의 IMU로부터 가속도 정보를 함께 활용하는 원샷 혼합정렬의 경우, 선체의 운동에 의한 영향을 크게 받아 해양 환경에 따라 초기 정렬 정확도가 매우 크게 변화할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. Sea state가 높은 환경에서는 MINS의 속도 및 자세 정보를 연속적으로 활용하여 유도탄의 자세를 추정하는 속도/자세 정합 기반의 전달정렬의 성능이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

2. 선행연구 분석

유도탄의 초기 정렬기법은 크게 자체정렬과 전달정렬로 구별할 수 있다. 자체 정렬기법은 고성능의 IMU를 활용하여 지구 자전각속도를 측정하여 유도탄의 정렬을 수행하는 것을 의미한다. 그러나 자체 정렬은 소요 시간이 매우 오래 걸리며, 지구 자전각속도를 분해할 수 있을 만큼의 고성능의 IMU가 요구된다

는 단점이 있다. 따라서 다양한 무기체계에서는 사전에 정렬된 Master Inertial Navigation System (MINS)의 정보를 활용한 전달정렬 방식의 초기 정렬 기법이 널리 사용되고 있다 (Britting 1971, Salychev 1998, Rogers 2003, Titterton & Weston 2004).

Park (2018)은 원샷정렬 수행 시 MINS와 Slave Inertial Navigation System (SINS) 간의 비정렬각을 측정하기 위해 장입 유도탄 단위에서 룰 회전을 통한 측정 방안을 제시한 바 있다. 측정된 비정렬각은 원샷정렬이나 원샷 혼합정렬 수행 시 SINS의 자세 결정에 직접적으로 활용되는 요인이다. Lee et al. (2022)은 경사발사 유도무기 시스템에서 MINS의 정보를 필터 기반으로 SINS의 자세를 계산하는데 사용한 바 있으며, 저장된 비정렬각과 시간지연 오차를 사용하여 전달정렬의 수렴 소요 시간을 획기적으로 줄이는 연구를 수행하였다.

Lee (2018)는 기존의 가속도계 출력을 중력과 비교하는 자세 추정 방법의 한계점을 극복하기 위해, 전달정렬 수행 시 고기동 환경에서 사전에 정의된 상태변수의 초기값이 수렴시간에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 사전에 추정한 초기값을 활용하여 수렴 시간을 줄이는 것을 확인한 바 있다. Lee et al. (2021)은 MINS에서 정보를 수신하는 과정에서 발생하는 시간 지연이 목표 정확도에 미치는 영향을 분석한 바 있으며, 플랫폼의 침로가 변경하면서 발생하는 자세 정보의 급격한 변화에 의해 목표정확도가 저하되는 것을 확인한 바 있다.

다양한 선행 연구에서는 MINS를 활용하여 SINS의 초기 자세를 결정하는데 있어, 비정렬각과 시간지연 오차에 대한 영향을 최소화하는 방향의 연구가 주를 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 해상 수직 발사 환경과 같이 함체의 동적 운동이 항법 정확도에 미치는 조건에서 여러 정렬 기법을 종합적으로 비교 분석 한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구는 기존 연구들과의 차별성을 두어, 유도탄 초기 정렬에 사용되는 대표적인 세 가지 기법에 대해 종합적인 분석을 수행한다. 또한 MSS 기반의 해양 모델링을 통해 파랑에 의한 함체 운동(hull motion)의 동적 영향을 정량적으로 반영하였으며, 이를 기반으로 해상 상태(sea state) 변화에 따른 각 정렬 기법의 항법 성능 영향을 비교하여 해상 수직 발사 환경에 최적화된 초기 정렬 기법을 제시하고자 한다.

3. 본론

3.1 초기 정렬 알고리즘

함상 플랫폼에서 운용되는 유도무기 체계는 해상 상태(sea state)가 높아질수록 파랑 및 선체 동요에 의해 발사 전 초기 자세를 안정적으로 추정하기 어렵다. 초기 자세를 정확하게 결정하지 못할 경우, 해당 오차는 관성항법 수행 시 항법해 오차에 그대로 전파되며, 시간이 지남에 따라 항법 정확도를 빠르게 저하시킨다. 따라서 해상 플랫폼에서 운용되는 유도무기에서는 sea state 조건에 따라 초기 정렬 방식을 적절히 선택해야 한다. 본 연구에서는 대표적인 초기 정렬 기법인 원샷 정렬, 원샷 혼합정렬, 속도/자세 정합 기반의 전달정렬의 세 가지 방법을 대상으로 sea state 수준 변화에 따른 정렬 정확도 및 항법 오차를 비교 · 분석하였

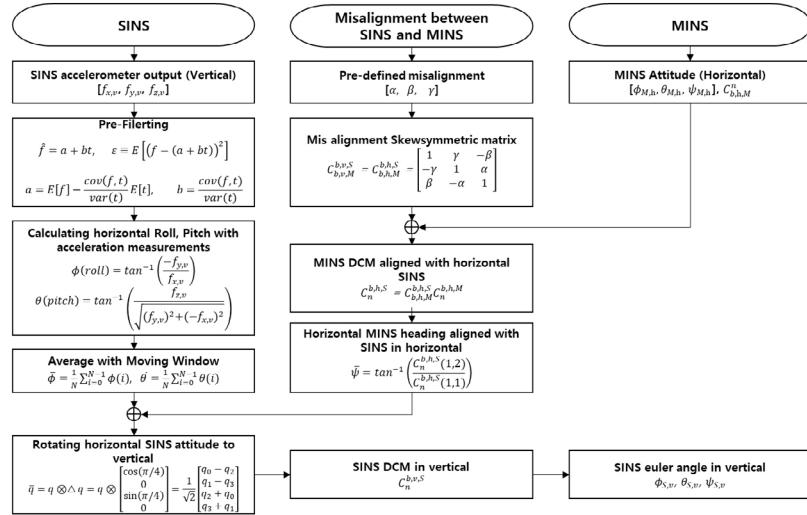


Fig. 1. One-shot mixed align algorithm.

다. 본 연구에서 적용한 세 가지 정렬 기법의 자세 결정 방법은 다음과 같다.

원상정렬은 Eq. (1)과 같이 상대적으로 정확한 자세를 결정할 수 있는 함자이로 또는 MINS의 자세 정보($C_{b,m}^n$)와 장착비정렬각($C_{b,s}^{b,m}$)을 고려하여 유도탄의 자세를 결정한다. 원상정렬은 한 시점의 MINS 자세를 사용하여 유도탄내 IMU의 자세를 결정하기 때문에 연산시간이 빠르고 수식이 간단하다는 장점이 있지만 MINS와 유도탄 내 IMU 간의 비정렬각을 사전에 정의해야 한다는 단점이 있다.

$$C_{b,s}^n = C_{b,m}^n C_{b,s}^{b,m} \quad (1)$$

원상혼합정렬에서 유도탄내 IMU의 roll(ϕ), pitch(θ)는 Eqs. (2, 3)과 같이 가속도를 활용한 개략정렬을 통해 계산되며 heading(ψ)은 Eq. (1)에서 결정된 ($C_{b,s}^n$)에서 Eq. (4)를 통해 계산된다. 원상혼합정렬도 원상정렬과 마찬가지로, SINS의 자세를 알기 위해서는 사전에 SINS와 MINS 간의 비정렬각($C_{b,s}^{b,m}$)을 정의해야 한다. 원상혼합정렬은 가속도를 사용하여 roll과 pitch를 계산하기 때문에 외력이 존재하지 않는 낮은 sea state 상황에선 정확한 자세를 결정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 sea state가 높아질수록 함의 병진운동에 의해 자세 정확도가 저하된다는 단점이 있다.

만약 수직 발사에서 수직상태의 SINS와 수평상태의 함자이로가 있다고 가정하게 되면, Fig. 1과 같은 과정을 통해 SINS의 자세를 결정하게 된다. 수평상태에서는 z축 가속도계에 중력값이 가장 크게 관측되지만 수직 상태인 경우, z축 가속도계에 중력이 거의 측정되지 않아 Eqs. (2, 3)을 그대로 적용하는 경우에는 특이점 문제가 발생할 수 있다. 따라서 SINS가 수직으로 장착되어 있는 경우에는 roll과 pitch를 계산할 때 축변환을 수행해야 한다 (Yu & Park 2007). Fig. 1에서의 수직상태의 센서 관측값($f_{x,v}, f_{y,v}, f_{z,v}$)을 수평상태로 회전변환 시킨 후 수평상태에서의 roll과 pitch를 계산된다. 이때, 한 시점의 가속도 관측치를 사용하여 수평 자세를 결정하게 되는 경우 센서 노이즈에 의한 영향이 발생하기 때문에 이를 제거하기 위해 Pre-filtering과 moving average를 취해 수평

자세를 결정한다. Eq. (4)에서 결정된 heading은 수평상태이기 앞서 결정된 roll, pitch와 함께 수직 상태로 회전변환하면 최종적으로 수직상태에서의 SINS 자세($C_n^{b,v,s}$)를 결정할 수 있다.

만약, 중간 과정에서 MINS의 자세와 비정렬각이 고려된 SINS의 자세 ($C_n^{b,h,s}$)를 수직 상태로 회전변환 하여 최종적인 유도탄의 자세($C_n^{b,v,s}$)를 결정하게 되면 원상 정렬을 수행한 것이 된다.

$$\phi(roll) = \tan^{-1}\left(\frac{-f_y}{-f_z}\right) \quad (2)$$

$$\theta(pitch) = \tan^{-1}\left(\frac{f_x}{\sqrt{(f_y)^2 + (f_z)^2}}\right) \quad (3)$$

$$\psi(heading) = \tan^{-1}\left(\frac{C_n^{b,s}(1,2)}{C_n^{b,s}(1,1)}\right) \quad (4)$$

속도/자세 정합 기반의 정렬 알고리즘은 상대적으로 정확도가 높은 MINS에서 획득된 속도와 자세를 활용하여 유도탄에 부착된 SINS의 속도 및 자세오차, MINS와의 비정렬오차, 시간지연 오차 등을 필터를 통해 연속적으로 추정하는 방법이다. MINS는 자체적으로 지구 자전각속도를 분해하여 자체정렬을 수행할 수 있으며, 정렬이 된 상태에서 자세, 속도를 산출할 수 있다. 정렬이 수행된 이후 MINS의 자세(Ψ_{master}^n)와 속도(v_{master}^n)를 관측치로 사용하여, 관성항법을 통해 초기 값으로부터 계산된 SINS의 속도와 자세를 보정하게 된다. 이때 SINS에서 계산된 속도(v_{slave}^n)에 lever-arm을 고려하여 MINS의 속도 추정치($\dot{\Psi}_{master}^n$)로 변환한 후 MINS 속도와 차이값을 관측치로 사용한다. SINS와 MINS 간의 자세 비교는 두 물체가 모두 강체에 장착되어 있다는 가정하에 비정렬각($C_{b,save}^{b,slave}$)을 반영하여 이루어진다. 속도/자세 정합 기반의 전달 정렬은 필터를 활용하여 오차 상태변수를 추정해야 하기 때문에 수렴시간이 오래 걸린다는 단점이 있지만 sea state에 따른 영향은 상대적으로 강건하며, 사전에 비정렬각을 결정하지 않아도 된다는 장점이 있다. 전달정렬의 속도 오차모델과 자세 오차모델은 각각 Eqs. (5, 6)과 같으며 장착비정렬 오차와 시간지연에 따른 오

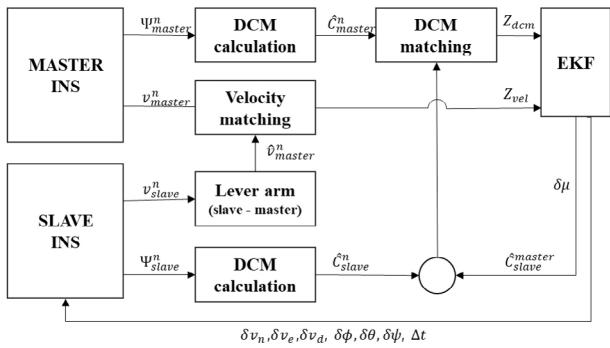


Fig. 2. Algorithm of transfer alignment (attitude and velocity matching).

차는 random constant로 모델링 하였다. 오차상태변수는 Eq. (7)과 같이 속도오차($\delta v_m, \delta v_e, \delta v_d$), 자세오차($\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi$), 장착비정렬오차($\delta\mu_x, \delta\mu_y, \delta\mu_z$), 시간지연오차(Δt)로 구성하였다. MINS에서 획득할 수 있는 속도(v_{master}^n)와 자세($C_{b,master}^n$) 정보를 활용하여 관측치 행렬을 Eq. (8)같이 구성하고 MINS의 속도와 자세가 주기적으로 획득되는 시점마다 EKF를 통해 오차상태 변수를 추정하여 error update를 수행하게 된다. 위의 과정을 요약하면, Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{v}^n &= (f^n) \times \varepsilon^n + \delta C_b^n f^b - (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) \\ &\quad \times v^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n + \delta g^n \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\omega_{in}^n \times \varepsilon + \delta\omega_{in}^n - C_b^n \delta\omega_{ib}^b \quad (6)$$

$$X_e = [\delta v_n, \delta v_e, \delta v_d, \delta \phi, \delta \theta, \delta \psi, \delta \mu_x, \delta \mu_y, \delta \mu_z, \Delta t]^T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Z_{6 \times 1} &= [\delta Z_{vel}, \delta Z_{DCM}(3,2), \delta Z_{DCM}(3,1), \delta Z_{DCM}(1,2)]^T \\ \delta Z_{vel} &= [\hat{v}_{master}^n - v_{master}^n]^T \end{aligned}$$

$$\delta Z_{DCM} = [C_{b, master}^n C_{b, slave}^{b, master} C_n^{b, slave} - I_{3 \times 3}]^T \quad (8)$$

3.2 시뮬레이션 데이터 생성

본 연구에서는 해양환경에서 운용되는 유도무기 체계의 초기 정렬 정확도를 평가하기 위해 파랑에 의한 함체 운동을 포함한 가속도 및 각속도 데이터를 시뮬레이션으로 생성하였다. 이를 위해 MSS를 활용하였다 (Perez et al. 2006). MSS는 노르웨이 과학 기술대학교(NTNU)에서 개발된 MATLAB/Simulink 기반 해양운동체 동역학 및 제어 시뮬레이션 툴박스로, 선박 및 수중운동체의 6자유도(6-DOF) 운동, 파랑 및 조류에 의한 외란, 그리고 항법·제어 알고리즘을 통합적으로 모델링할 수 있다.

본 연구의 시뮬레이션 데이터에서는 파랑 스펙트럼을 입력으로 하여 해상 상태에 따른 운동을 모사하였으며, 이를 기반으로 함정에 탑재된 MINS의 위치, 속도, 자세를 생성하였다. 해상 환경의 파랑 특성을 모사하기 위해 Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) 스펙트럼을 적용하였으며, 유의파고(significant wave height)는 sea state 2와 sea state 5에 대해서 각각 0.5 m와 4 m로 설정하였다. 파도의 진행 방향은 함정의 진행 방향에 대해 45° 기울어진 방향에서 임사하는 것으로 가정하였으며, 파랑 시

Table 1. Specification of SINS.

Sensor	Parameter	Value
Gyroscope	Bias	0.5°/hr
	ARW	0.04°/√hr
	Scale factor	100 ppm
	Misalignment	0.02 mil
Accelerometer	Output rate	200 Hz
	Bias	200 µg
	ARW	50 µg/√hr
	Scale factor	200 ppm
	Misalignment	0.02 mil
	Output rate	200 Hz

Table 2. Specification of MINS.

Parameter	Value
Attitude	0.7 mil
Velocity	0.05 m/s
Time delay	20 msec
Output rate	12.5 Hz

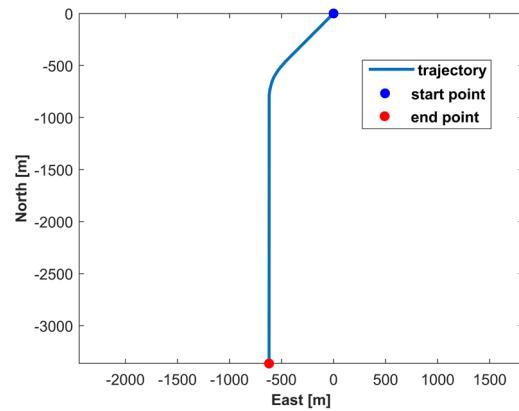


Fig. 3. Trajectory of simulation data.

계열 생성은 JONSWAP 스펙트럼으로부터 선택된 서로 주파수 성분을 기반으로 각 성분에 대응하는 진폭과 위상을 부여한 후, 이를 중첩하여 합성 파랑을 구성하는 방식으로 수행하였다. 이러한 절차를 통해 함체 운동에 영향을 주는 파랑의 비정상적·확률적 특성을 재현하였으며, 생성된 파랑 입력은 MSS 6-DOF 선체 모델에 적용되어 sea state별 함체의 운동을 모사하였다. 파랑 입력에 따른 함정의 응답을 모사하기 위해 적용된 함정의 길이는 88 m, 배수량은 약 6400 t급이다.

생성된 MINS 데이터에서 SINS까지의 레버암을 고려해 SINS의 위치, 속도, 자세를 생성하고 시간에 따른 미분을 수행하여 SINS의 참값의 가속도, 각속도를 생성하였다. 시뮬레이션은 일정한 초기 위치(위도, 경도, 고도)를 기준으로 등속 운동을 수행하고 1회 변침하는 것을 가정하여 생성되었으며, 코리올리 효과와 중력 가속도 변화 등 지구 모델을 반영하였다.

SINS 데이터는 200 Hz로 샘플링 하였으며, 실제 운용 환경을 반영하기 위해 자이로 및 가속도계에 대해 백색잡음과 바이어스 드리프트, 비정렬오차 등을 포함하였다. 이를 통해 실제 해상 환경에서의 항법 센서 동특성을 반영한 초기 정렬 성능 평가가 가능하도록 구성하였다. 시뮬레이션 데이터 생성시 밝혀진 SINS

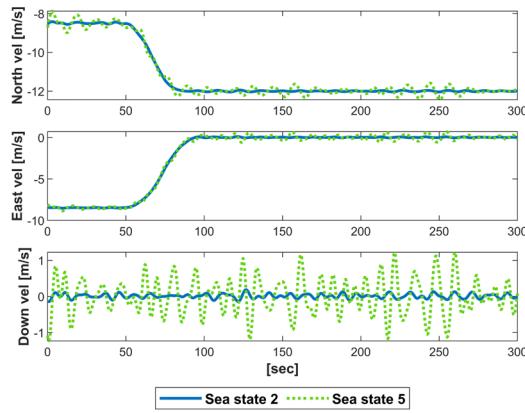


Fig. 4. Velocity of simulation data (NED).

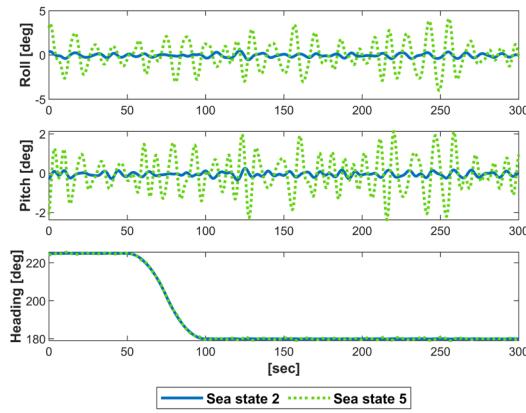


Fig. 5. Attitude of simulation data.

는 tactical 수준의 IMU를 가정하였으며 자이로와 가속도계는 오차는 Table 1과 같다. Master INS는 gTALIN 5000급의 정밀항법 장치를 가정하였으며 속도 자세 오차는 Table 2와 같다. MISN와 SINS 간에 통신 환경에 따른 시간지연 오차는 지상플랫폼에서 개발된 유사 무기체계를 참고하여 20 msec로 가정하였다.

생성된 시뮬레이션데이터는 Fig. 3과 같이 남쪽으로 이동하는 경로이며, heading 225도로 약 50초간 등속운동으로 진행하고 -45도 변침을 50초간 수행한 후 다시 직진 등속운동을 약 200초간 수행한다. Figs. 4와 5는 시간에 따른 함정의 자세와 속도를 표현한 것이다. 이때 sea state에 따른 정밀 정확도를 분석하기 위해 sea state 2와 sea state 5 환경에서의 데이터를 각각 생성하였다.

Sea state에 따라 생성된 궤적과 속도, 자세를 시간에 따라 미분하여 가속도, 각속도 데이터를 생성하였다. 생성된 가속도 데이터는 Fig. 6과 같다. sea state 5의 가속도 값이 sea state 2에 비하여 측정치의 범위가 훨씬 넓은 것을 알 수 있으며 sea state 5에서 z축 방향의 가속도 표준편차는 약 0.32 m/s²로 sea state 2일 때의 가속도 표준편차인 0.09 대비 약 3.6배가량 큰 것을 확인할 수 있으며 적절하게 해양 상황이 반영된 것으로 보인다.

3.3 초기 정밀 정확도 분석

생성된 시뮬레이션 데이터를 기반으로 원샷정렬, 원샷혼합정

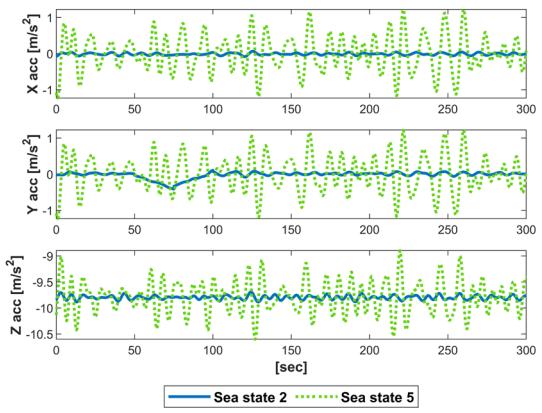


Fig. 6. Acceleration of simulation data (body frame).

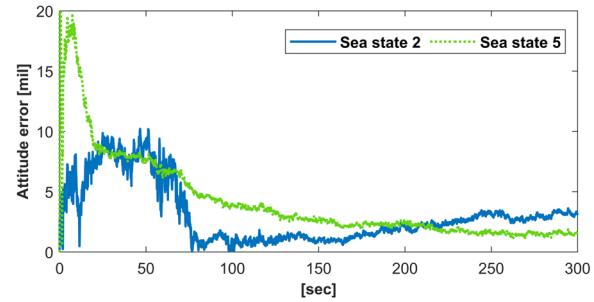


Fig. 7. Estimated heading error of velocity/attitude matching transfer alignment.

Table 3. Initial attitude accuracy without flexure and time delay.

Alignment method	Roll [mil, 1σ]	Pitch [mil, 1σ]	Heading [mil, 1σ]
One-shot align	1.77	1.77	1.77
Sea state 2 One-shot mixed align	1.49	1.6	1.78
Transfer align	0.15	0.06	3.11
One-shot align	1.77	1.77	1.77
Sea state 5 One-shot mixed align	12.26	13.23	1.77
Transfer align	0.16	0.07	1.37

렬, 속도/자세 정합 기반의 전달정렬을 수행한 결과 알고리즘 별 초기 정확도는 Table 3과 같다. 원샷 정렬의 경우 3축의 MINS 자세와 비정렬각을 통해 SINS의 자세가 결정되기 때문에 MINS의 측정정밀도와 비정렬각의 측정정밀도에만 영향을 받게 된다. 따라서 함이 뒤틀리는 flexure에 의한 영향이나, MINS와 SINS 간의 시간 지연에 따른 오차를 고려하지 않는 경우에는 sea state에 따라 자세 정확도가 달라지지 않는다. 따라서 추가적으로 flexure에 의한 영향과 시간지연에 따른 오차를 반영해야 한다.

원샷 혼합정렬의 경우, SINS의 가속도계로부터 개략정렬을 통해 roll과 pitch를 결정하기 때문에 정지상태라는 가정이 필요하다. 낮은 sea state 상황에서는 각 축에 외력에 의한 가속도 관측치가 상대적으로 작은 크기로 섞이게 되어 정확한 수평 자세 결정이 가능하다. 그러나 함이 파도에 의해 연속적인 크게 움직이고 있는 높은 sea state에서는 다른 정렬 방법에 비해 정확도가 낮은 것을 알 수 있었다 Eqs. (2, 3)은 정지상태에서 각 축의 중력 측치를 사용하여 수평 자세를 결정하게 되는데 SINS의 가속도계

Table 4. Effect of flexure and time delay.

Error source	Roll [mil, 1σ]	Pitch [mil, 1σ]	Heading [mil, 1σ]
Sea state 2	Flexure	0.29	0.29
	Time delay	0.05	0.05
Sea state 5	Flexure	1.90	1.90
	Time delay	0.40	0.40

에 파도에 의한 운동에서 발생되는 가속도가 함께 관측되어 정확한 자세 결정이 어려운 것으로 사료된다.

속도/자세 정합 기반의 전달정렬의 경우, sea state 5에서 결정된 heading의 정확도(1.37 mil)가 sea state 2에서 결정된 heading 정확도(3.11 mil)에 비해 높은 것을 알 수 있다. 속도/자세 정합의 특성상, 높은 기관축성이 요구되는데 가속도 운동이나 선회 운동이 잦은 높은 sea state에서 기관축성이 확보되는 것으로 보인다 (Kim et al. 1996). Fig. 7과 같이 Sea state 2에서 추정된 heading은 변침이 일어나는 50~100초 구간이 지난 후 직진 등속 운동구간에서 점진적으로 오차가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 등속 직인 운동을 수행하는 경우 항체의 자세 변화가 없기 때문에 불완전한 관측 시스템이다 (Chung et al. 1989). 따라서 시간이 지남에 따라 추정 오차가 누적되어 heading 정확도가 감소하는 형태를 보이게 된다. 반면 Sea state 5에서 추정된 heading 오차는 변침 구간이 지난 이후에도 오차가 계속적으로 감소하는 것을 확인하였다. Sea state가 높아질수록 파도에 의한 항체의 가속이나 각속도 운동이 커지기 때문에 자세 변화가 상대적으로 크게 발생하여 기관축성이 확보되고 결과적으로 추정된 자세 정확도가 높은 것을 확인할 수 있었다.

앞서 언급한 바와 같이 Table 3에서 명시된 초기 자세 정확도에는 flexure나 시간지연에 따른 오차가 반영되어 있지 않기 때문에 이를 추가로 고려해야 한다. flexure는 강체가 아닌 물체의 뒤틀림에 의해 발생되게 되는데, sea state가 높아질수록 함이 뒤틀리는 양도 커지게 된다. 이때 flexure에 의해 발생되는 자세 오차는 Mennitt (1990)을 참고하였다.

추가적으로 SINS와 MINS 간의 통신 지연에서 발생되는 시간지연 오차도 sea state가 높아질수록 MINS와 SINS의 자세 변화량이 커지기 때문에 고려되어야 한다. 통신지연에 의한 자세 오차는 생성된 simulation 데이터를 기반으로 20 msec의 시간지연 유무에 따른 영향을 통계적으로 분석하여 정의하였다.

최종적으로 sea state에 따라 발생되는 flexure와 시간지연에 따른 자세 오차는 Table 4와 같이 정리될 수 있다. 원샷 정렬과 원샷 혼합정렬의 경우에는 Table 4의 flexure와 time delay에 의한 영향을 모두 Root Square Sum을 하여 최종적인 초기 자세 정확도를 결정하였고, 속도/자세정합 기반의 전달정렬은 오차상태 변수에 시간지연 오차를 포함하여 추정하기 때문에 flexure에 의한 영향만 반영하여 최종적인 초기 자세 정확도를 결정하였다 (Table 5).

3.4 관성 항법 정확도 분석

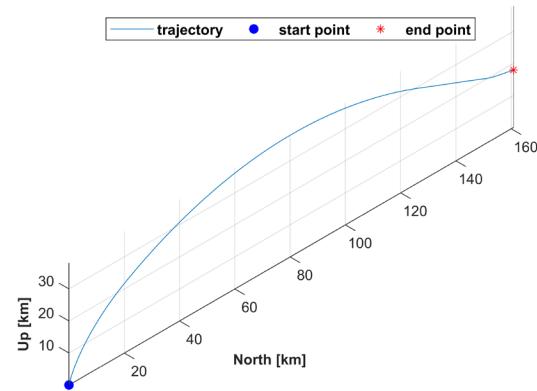
항법 오차는 Table 5에서 정의된 각각의 자세 정확도를 초기 자세의 정확도라고 가정한 상태에서 관성항법을 수행했을 때 오

Table 5. Initial attitude accuracy with flexure and time delay.

Alignment method	Roll [mil, 1σ]	Pitch [mil, 1σ]	Heading [mil, 1σ]
Sea state 2	One-shot align	1.79	1.79
	One-shot mixed align	1.52	1.63
	Transfer align	0.33	0.30
Sea state 5	One-shot align	2.63	2.63
	One-shot mixed align	12.41	13.24
	Transfer align	0.43	0.43

Table 6. Inertial navigation error.

Alignment method	Horizontal error [m, 2DRMS]	Vertical error [m, 2DRMS]
Sea state 2	One-shot align	901.07
	One-shot mixed align	834.54
	Transfer align	897.04
Sea state 5	One-shot align	1297.91
	One-shot mixed align	4855.13
	Transfer align	489.88

**Fig. 8.** 3D flight trajectory of inertial navigation.

차를 가정하였으며 100회 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 산출하였다. 항법 성능을 검증하기 위해 적용된 궤적은 Fig. 8과 같다. 궤적의 수평거리는 약 160 km이며 최대 고도는 약 38 km이다. 수직상태에서 발사를 수행하여 정북 방향으로 최대 3 마하의 속도로 이동한 후 고도 18 km 지점에서 비행이 종료된다.

자세 결정 방법과 sea state에 따라 산출된 초기 자세 정확도를 반영하여 산출된 관성 항법 정확도는 Table 6과 같다. Sea state 2에서는 원샷 혼합정렬의 수평 정확도가 834.54 m로 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며 이는 원샷 혼합정렬의 heading 방향오차가 1.78 mil로 세가지 정렬 기법 중 가장 정확하기 때문으로 사료된다. 수직 정확도는 자세/속도 정합 기반의 전달정렬이 294.41 m로 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며 roll과 pitch방향의 정확도가 0.3 mil 수준으로 정확하게 추정되었기 때문으로 보인다.

Sea state 5의 경우 속도/자세 정합 기반의 전달정렬 기법에서 추정된 3축의 자세가 가장 정확했기 때문에 관성항법의 수평, 수직방향의 정확도가 가장 정확한 것으로 확인되었다. 파도가 잔잔한 상태에서는 flexure와 시간지연의 영향이 상대적으로 작기 때문에 MINS의 3축 자세를 활용하는 원샷 혼합정렬 이후 관성 항법을 수행하는 것이 오차가 작은 것으로 나타났다. 상대적으로 파도의 요동이 거친 상태에서는 속도/자세 정합기반의 전달정렬

의 가관측성이 확보되기 때문에 초기 정렬을 정확하게 수행할 수 있어 관성항법의 오차가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 해양 환경에서 운용되는 수직발사 무기체계에 적용 가능한 다양한 초기 정렬 기법의 성능을 검증하고, 이에 따른 관성항법 정확도를 평가하였다. 해상 플랫폼의 실제 운용 환경을 반영하기 위해 MSS를 기반으로 파도의 영향을 고려한 시뮬레이션 데이터를 생성하였으며, 초기 정렬 정확도 및 관성항법 오차에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과, 비교적 잔잔한 해양 상태에서는 원샷 혼합 정렬을 적용하는 것이 관성항법 정확도를 확보하는 데 가장 효과적인 것으로 나타났다. 파도에 의한 외력이 낮은 경우 SINS의 가속도가 SINS의 자세를 표현하는데 충분히 정확한 값을 출력한 것으로 보인다. 반면, 파고가 높은 거친 해상 환경에서는 MINS의 속도 및 자세 정보를 지속적으로 연동하는 전달 정렬 기법이 항법 오차를 최소화하는 데 가장 효과적임을 확인하였다. 이는 거친 파도에 의해 발생하는 운동이 충분한 가관측성을 제공하기 때문으로 해석된다. 반면 원샷 혼합정렬의 경우 sea state가 높아짐에 따라 SINS 가속도계에 파도에 의한 외력이 함께 측정되어 상대적으로 자세 결정의 정확도가 저하된 것으로 보인다.

향후 연구에서는 본 연구에서 적용한 10차 속도/자세 정합 기반 전달정렬의 상태 변수를 고도화할 필요가 있다. 특히, 기존 선행 연구들에서 시도한 바와 같이 down 방향 속도를 상태 변수 제거하거나, flexure 영향을 상태 변수에 반영하는 등의 방법들을 검토하여 해상 상태에 더욱 적합하고 성능이 향상된 상태 변수 모델을 개발할 예정이다. 추가적으로, 선체의 다양한 구동(가속, 선회 등)을 모사 및 실측하고, 이러한 동적 환경이 전달정렬 알고리즘에 미치는 영향을 가관측 행렬 분석을 통해 정량적으로 분석하여 최적의 정렬 성능을 확보하기 위한 기반을 마련하고자 한다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Y. Lee, T. Ahn and H. Hong; methodology, Y. Lee, S. Lee, S. Kang and D. Kim; software, Y. Lee, S. Kang and S. Lee; validation, T. Ahn and H. Hong; formal analysis, T. Ahn and D. Kim; investigation, Y. Lee, T. Ahn, H. Hong, S. Kang and D. Lee; resources, Y. Lee, T. Ahn, H. Hong, S. Kang, D. Kim and S. Lee; data curation, Y. Lee and S. Lee; writing—original draft preparation, Y. Lee, T. Ahn, S. Lee; writing—review and editing, T. Ahn and H. Hong; visualization, Y. Lee and D. Kim and S. Lee; supervision, T. Ahn and H. Hong; project administration, T. Ahn and H. Hong; funding acquisition, T. Ahn.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Britting, K. R. 1971, *Inertial Navigation Systems Analysis*, 1st Ed. (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.)
- Chung, T. H., Park, H. W., & Lee, S. J. 1989, Analysis of Observability for Strapdown Inertial Navigation System, *Institute of Control, Robotics and Systems*, 10, 45-49. <https://www.koreascience.kr/article/CFKO198911919685875.view>
- Kim, K. J., Ko, Y. W., & Park, C. W. 1996, A Study of Observability Enhancement by Matching Methods at Sea, *Institute of Control, Robotics and Systems*, 2, 867-870.
- Lee, H. S. 2018, Rapid Initial Alignment Method of Inertial Navigation System Using Adaptive Time Delay Compensation, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 67, 433-439. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.3.433>
- Lee, I., Yu, H., Kim, C., Oh, J., Yun, S., et al. 2022, A Study on the Possibility of Stored Transfer Alignment in the Inclined Launching Guided Missile System for a Warship, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 28, 1199-1205. <https://doi.org/10.5302/JICROS.2022.22.0156>
- Lee, S. H., Kim, B. R., & Jung, Y. T. 2021, Analysis of The Effect on Underwater Projectile's Target Accuracy depending on The Transfer Alignment Error, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22, 418-424. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.7.418>
- Mennitt, S. H. 1990, The Effects of Ship Load Variations and Seastate on Hull Girder Deflection and Combat System Alignment, Master Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Park, D.-H. 2018, A Calculation Method for the Tilt Angle of Missile Round using Roll Rotation, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 22, 500-506. <https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.6.500>
- Perez, T., Smogeli, Ø. N., Fossen, T. I., & Sørensen, A. J. 2006, An Overview of the Marine Systems Simulator (MSS): A Simulink Toolbox for Marine Control Systems, Modeling, Identification and Control, 27, 259-275. <https://doi.org/10.4173/mic.2006.4.4>
- Rogers, R. M. 2003, *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, 3rd Ed. (Reston: AIAA Education Series). <https://doi.org/10.2514/5.9781600861598.0000.0000>
- Salychev, O. 1998, *Inertial Systems in Navigation and*

- Geophysics, 1st Ed. (Moscow: Bauman MSTU Press).
- Titterton, D. H. & Weston, J. L. 2004, Strapdown inertial navigation technology, 2nd Ed. (Hertfordshire: The Institution of Engineering and Technology). <https://doi.org/10.1049/PBRA017E>
- Yu, M. J. & Park, C. J. 2007, Rapid Alignment for SDINS Using Equivalent Linear Transformation, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 35, 419-425. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2007.35.5.419>

include inertial navigation systems.



Suyong Lee received the B.S. degree in mechanical and aerospace engineering and M.S. degree in aerospace engineering from Seoul National University, South Korea in 2022 and 2025, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a research engineer. His research interests include inertial navigation systems.



Yong Lee received the B.S., and Ph.D. degrees in geoinformatics from University of Seoul, South Korea, in 2014 and 2023, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a senior research engineer. His research interests include inertial navigation system.



Tae-dong Ahn received the B.S. and M.S. degrees in electrical and computer engineering from Seoul National University, South Korea in 2006 and 2009, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a chief research engineer. His research interests include inertial navigation systems.



Hyunwook Hong received the B.S. degree in electronics engineering from KyungHee University, South Korea in 2011. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a senior research engineer. His research interests include inertial navigation and vision based-navigation systems.



Seonghyeon Kang received the B.S. degree in biomedical engineering from Hanyang University, South Korea in 2022. She is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a senior research engineer. Her research interests include inertial navigation systems.



Dayea Kim received the B.S and M.S degrees in Aerospace engineering from Konkuk University, South Korea in 2022 and 2024, respectively. She is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a research engineer. Her research interests