

Development of Navigation HILS System for Integrated Navigation Performance Analysis of Large Diameter Unmanned Underwater Vehicle (LDUUV)

Tae-Suk Yoo*, Moon Hwan Kim*, Jong Hyun Hwang* and Seon Il Yoon*

*Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co. Ltd, Seongnam, Korea

대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 성능 분석을 위한 항법 HILS 시스템 개발

유태석* · 김문환* · 황종현* · 윤선일*

*LIG넥스원(주) 마린타임 연구소

KEY WORDS: INS 관성항법장치, DVL 속도보정장치, HILS (Hardware in the loop simulation), FMS (Flight motion simulator), EKF 확장칼만필터

ABSTRACT: This paper describes the development of a navigation HILS (hardware in the loop simulation) system for an integrated navigation performance analysis of a large diameter unmanned underwater vehicle (LDUUV). The HILS system was used for the performance analysis of the LDUUV. When a conventional HILS system is used, it is not possible to calculate the velocity and position using an inertial navigation system (INS). To cope with this problem, an external acceleration was generated. To evaluate the proposed method, we compare the results of a Monte Carlo simulation and navigation HILS experiment.

1. 서 론

무인잠수정의 항법 시스템은 수중 환경의 특수성으로 인한 제한사항으로 GPS(Global positioning system) 정보 사용이 불가능하다. 이에 지상에서 운용되는 무인지상차량(UGV, Unmanned ground vehicle) 및 공중에서 운용되는 무인항공기(UAV, Unmanned aerial vehicle)와는 차별화된 항법 시스템 설계가 필요하다(Yoo et al., 2014).

특히 대형급 무인잠수정의 경우 수중 항행 시간이 길고 장기간 운영을 해야 하기 때문에 복합항법의 정확성에 대한 중요성이 높다. 전체 임무 수행에 있어서 탐색용 무인잠수정의 위치 정보는 매우 중요한 요소이며, 보다 정밀한 위치정보 산출을 위하여 복합 항법 알고리즘 개발에 다양한 연구가 이루어지고 있다(Yanrui et al., 2010; Wanli et al., 2013).

관성측정장치(IMU, Inertial measurement unit) 및 속도 보정장치는 복합 항법을 구현하기 위해 필요한 수중 환경에서 사용하는 대표적인 센서이다. IMU는 비력을 측정하는 가속도계

와 회전운동을 측정하는 자이로를 이용하여 항체의 가속도 및 각속도 정보를 측정하고 이를 통해 주위 환경에 영향 받지 않 고자세 및 속도, 위치정보를 독립적으로 계산할 수 있다. 하지만 IMU를 통해 계산된 항법정보는 짧은 시간에는 정확하나 각 속도와 가속도 성분을 적분하여 항법 결과를 계산하는 특성으로 인하여 오차가 누적되는 단점이 있다. 이러한 IMU의 단점을 극복하고 성능을 향상 시키기 위해 속도보정장치 등 외부센서를 이용하여 계산된 항법 결과값을 보정하는 방법이 다양하게 연구되고 있다(Lee et al., 2004). 속도보정장치는 도플러 속도 센서(DVL, Doppler velocity log)나 모터의 회전 속도를 이용한 방법 등이 있으며 해류 및 조류에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 DVL이 많이 사용되고 있다(Lee et al, 2003a; Lee et al, 2003b).

위와 같이 구성된 수중복합항법장치에 대한 항법 알고리즘의 성능을 검증하는 방법은 크게 시뮬레이션, 차량시험, 해상시험으로 나누어 진다. 시뮬레이션은 선정된 센서의 사양에 맞게 IMU 및 기타 보조 센서들에 대한 모델링을 수행하고 목적에 맞

Received 22 August 2016, revised 12 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Tae-Suk Yoo: +82-31-8026-4309, taesuk.yoo@lignex1.com

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

는 궤적, 속도 등의 조건을 설정한 후 몬테카를로 기법을 통한 시뮬레이션을 수행하여 항법알고리즘 성능을 도출한다. 지상테스트는 차량에 관성항법장치를 장착 후 실 주행을 통해 복합항법 수행 후 결과를 분석한다. 복합항법에서 사용되는 속도정보는 차량의 속도계 또는 GPS의 속도 정보를 활용한다. 지상테스트는 실제 센서 출력값을 활용한 연산을 수행 할수 있는 장점을 가지며 필요에 따라 시뮬레이션에서 수행된 결과 값과 비교하여 알고리즘 보완에 활용할 수 있다. 해상시험은 실제역에서 수중운동체를 운용하는 시험방법으로 실제 관성항법장치 및 속도 보정장치를 사용하여 복합적인 성능을 산출하는 시험이다. 특히 수중에서 사용되는 속도 보정장치를 통한 실제적인 속도 입력이나 수중운동체의 운동 특성과 같은 실제적인 데이터에 기반으로 복합항법을 수행할 수 있기 때문에 시뮬레이션이나 지상 항법에서 확인 할 수 없는 다양한 이슈들을 확인 할 수 있다. 해상시험은 전체 시스템을 실제적으로 검증하는 이점을 가지지만 다른 시험에 비해 비용 및 시간에 많은 제약을 가진다.

해상시험의 비용 및 시간 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 HILS(Hardware in the loop simulation) 시스템을 기반으로 한 시스템 검증 방법이 도입되었다. HILS 시스템은 수중운동체의 수중환경에서 운동 특성을 모의하여 실제적인 하드웨어 및 소프트웨어를 복합적으로 검증하는 시스템이다(Hwang et al., 2013).

일반적인 HILS 시스템에서는 자세모의를 수행하는 FMS (Flight motion simulator)에 관성항법장치를 장착시켜, 운동모델을 통한 FMS 제어를 통해 무인잠수정의 자세변화를 모의한다. FMS에 장착된 관성항법장치는 모의된 자세변화를 측정하여 항법 연산을 수행한다. 이러한 HILS 시스템은 근본적으로 FMS가 회전운동만 수행하기 때문에 가속도값을 모의 할수 없는 문제를 내포하고 있다. 수중운동체의 자세 제어를 목적으로 하는 HILS 시스템에서는 가속도 정보의 부재는 큰 문제가 되지 않지만 위치 정보를 필요로 하는 무인잠수정에서는 가속도의 부재는 복합항법을 수행할 수 없게 만든다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 대형급 탐색용 무인잠수정의 복합항법 성능 분석이 가능한 새로운 HILS 시스템을 제안한다. FMS는 회전운동만 하고 있기 때문에 가속도계는 중력가속도만 측정하지만 운동모델을 이용하여 외부 가속도를 생성한 후 항법장치 가속도계의 출력값에 더해지게 되면 항법장치는 속도, 위치 정보도 계산하여 출력할 수 있다. 하지만 수학적 운동 모델에서 추출된 외부가속도는 이상적인 값이기 때문에 실제와 상이한 부분이 있다. 이에 자이로 출력값, 복합항법 필터에서 계산되는 출력값을 이용하여 운동모델 정보만 사용하는 것 보다 실제와 더 유사한 외부가속도를 생성한다. 항법장치 관점에서 보게 되면 자이로, 가속도계의 출력값을 그대로 사용하고 외부가속도 정보만 추가 되기 때문에 시뮬레이션 보다 실제와 유사한 항법 결과값을 도출할 수 있다. 또한 무인잠수정의 운동모델을 바탕으로 시험을 수행하여 차량시험에 비해 무인잠수정의 운동특성에 더 가깝게 시험할 수 있으며, 실내에서 반복된 실험을 통하여 해상시험 전 시간, 비용을 절약할 수 있다.

항법 HILS 시스템 검증을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 결과와 항법 HILS 결과를 비교함으로써, 구축된 항법 HILS 시스템에 대한 성능 검증을 하였다.

2. 복합 항법 모델

본 논문에서는 외부 속도정보를 이용한 대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 알고리즘을 적용하며, 알고리즘 구조는 Fig. 1에 나타나 있다.

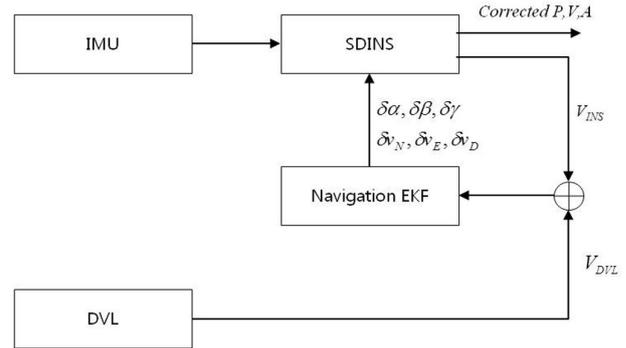


Fig. 1 Structure of navigation system

관성항법시스템은 외부 환경으로부터 영향을 받지 않는 큰 장점을 가지고 있어 주요 항법 시스템으로 사용된다. 스트랩다운형 관성항법시스템(SDINS, Strapdown inertiel navigation system)의 항법 좌표계(NED, North east down)에서의 속도에 대한 미분방정식을 정리하면 다음과 같다(Titterton and Weston, 1997).

$$\dot{V}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n \quad (1)$$

이 때, 식 (10)에 대한 기호들의 정의는 다음과 같다.

$$V^n = [V_N \ V_E \ V_D]^T \quad (2)$$

$$\omega_{ie}^n = [\Omega \cos L \ 0 \ -\Omega \sin L]^T \quad (3)$$

$$\omega_{en}^n = [\dot{l} \cos L \ -\dot{L} \ -\dot{l} \sin L]^T \quad (4)$$

$$\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n \quad (5)$$

여기서 V^n 은 항법 좌표계에서의 속도, f^b 와 C_b^n 은 각각 항체 좌표계에서 비력과 항법 좌표계로의 변환행렬, Ω 는 지구자전각속도, L 은 위도, l 은 경도, g^n 은 위도에 따른 중력성분, ω_{en}^n 과 ω_{ie}^n 는 각각 지구 고정 좌표계의 항법 좌표계에 대한 각속도와 항법 좌표계에서 표현된 지구 고정 좌표계의 관성좌표계에 대한 각속도와 나타내고 자세한 유도 과정은 참고문헌에 상세히 나타나 있다(Titterton and Weston, 1997).

항법좌표계와 항체좌표계 사이의 DCM(Direction cosine matrix)인 C_b^n 을 계산하기 위한 미분방정식은 식 (6)과 같다.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n \quad (6)$$

여기서 Ω_{ib}^b 는 자이로의 측정치 ω_{ib}^b , Ω_{in}^n 은 식 (5)와 같이 지구자전 각속도, 위도 및 경도변화율로 구성되며 외대칭 (Skew-symmetric) 행렬이다. 항법좌표계에서의 속도미분방정 식인 식 (1)과 자세미분방정식인 식(6)에 대한 오차모델을 유도하기 위하여 섭동법 (Perturbation)을 이용한다. 섭동법은 항법 알고리즘으로 얻어진 각각의 변수와 실제 값의 차를 오차변수로 두어 시스템을 해석하는 것으로 오차의 크기가 작은 경우에 적용될 수 있다. 자세, 속도, 위치 및 IMU에 오차가 존재한다는 가정 하에 섭동법을 이용하여 항법 오차 모델을 유도하면, 속도오차모델 및 자세오차 모델은 식 (7), 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\delta \dot{V}^n = [f^n \times] \phi + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times V^n + \delta g^n \quad (7)$$

$$\dot{\phi} = -\omega_{in}^n \times \phi - C_n^b \delta\omega_{ib}^b + \delta\omega_{in}^n \quad (8)$$

위 식에서 ϕ 는 자세오차 항을 나타낸다. 이 때, 본 논문에서는 외부센서 정보는 속도 정보가 유일하기 때문에 항법 오차 모델에서 위치 오차와 관련 있는 항은 오차를 업데이트할 경우 오히려 더 발산할 경우가 있으므로 제외하였으며, 이는 다음 식 (9), (10)와 같이 재정리 된다.

$$\delta \dot{V}^n = [f^n \times] \phi + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n + \delta g^n \quad (9)$$

$$\dot{\phi} = -\omega_{in}^n \times \phi - C_n^b \delta\omega_{ib}^b \quad (10)$$

식 (9), (10)으로 얻어진 속도오차, 자세오차의 미분방정식을 결합하여 시변선형시스템을 구성하면 시스템 모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q(t)) \quad (11)$$

$$x = [\delta v_N \ \delta v_E \ \delta v_D \ \delta\alpha \ \delta\beta \ \delta\gamma \ \nabla_N \ \nabla_E \ \nabla_D \ \epsilon_N \ \epsilon_E \ \epsilon_D]^T \quad (12)$$

여기서 $x(t)$ 는 수중운동체의 속도오차($\delta v_N, \delta v_E, \delta v_D$), 자세오차($\delta\alpha, \delta\beta, \delta\gamma$), 가속도 바이어스 오차($\nabla_N, \nabla_E, \nabla_D$), 자이로 바이어스 오차($\epsilon_N, \epsilon_E, \epsilon_D$)로 이루어진 12차 상태변수이며, $w \sim N(0, Q(t))$ 는 가정된 시스템 노이즈로서 평균이 0이고, 분산이 Q 인 백색 가우시안 잡음(White gaussian noise)이다. 추정된 12개의 상태 변수는 실시간으로 속도, 자세, 가속도 바이어스, 자이로 바이어스에 대한 보상을 하게 된다.

시변 시스템 행렬 $F(t)$ 는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & 0_{3 \times 3} & F_{24} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{v_D}{R} & -2(\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R}) & \frac{v_N}{R} \\ 2\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R} & \frac{v_N \tan L}{R} + \frac{v_D}{R} & 2\Omega \cos L + \frac{v_E}{R} \\ -\frac{2v_N}{R} & -2(\Omega \cos L + \frac{v_E}{R}) & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -f_D & f_E \\ f_D & 0 & -f_N \\ -f_E & f_N & 0 \end{bmatrix}, \quad F_{13} = C_b^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tan L}{R} & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -(\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R}) & \frac{v_N}{R} \\ \Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R} & 0 & \Omega \cos L + \frac{v_E}{R} \\ -\frac{v_N}{R} & -(\Omega \cos L + \frac{v_E}{R}) & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$F_{24} = -C_b^n = \begin{bmatrix} -c_{11} & -c_{12} & -c_{13} \\ -c_{21} & -c_{22} & -c_{23} \\ -c_{31} & -c_{32} & -c_{33} \end{bmatrix} \quad (18)$$

위 식에서 f_N, f_E, f_D 와 v_N, v_E, v_D 는 각각 항법좌표계에서의 가속도 및 속도를 나타내며, R 은 다음과 같이 정의된다.

$$R_m = \frac{R_0(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 L)^{3/2}}, \quad R_t = \frac{R_0}{(1-e^2 \sin^2 L)^{1/2}} \quad (19)$$

$$R = \sqrt{R_m R_t} \quad (20)$$

R_m 과 R_t 는 지구 반지름과 관련된 값이고 R_0 는 적도에서의 지구반지름, e 는 지구의 이심률(Ellipticity)를 나타낸다.

SDINS와 DVL로부터 측정오차식을 유도하면 칼만 필터의 측정 모델식이 얻어지며 이는 다음과 같다.

$$z(t) = Hx(t) + v(t), \quad v \sim N(0, R(t)) \quad (21)$$

$$z = \delta V^n = \begin{bmatrix} v_{N,INS} - v_{N,DVL} \\ v_{E,INS} - v_{E,DVL} \\ v_{D,INS} - v_{D,DVL} \end{bmatrix} = Hx + v \quad (22)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

위 식에서 $v \sim N(0, R(t))$ 는 가정된 시스템 노이즈로서 평균이 0이고, 분산이 R 인 백색 가우시안 잡음이다.

이 때, IMU의 노이즈 특성을 반영하여 복합항법 필터의 Q 를

설정하고 R은 반복된 시뮬레이션을 통해 최적화된 계수를 찾아 반영하였다. 식 (13)과 식 (23)을 이용하여 가관측행렬의 랭크 (Rank)를 구하게 되면 12가 나오게 되며 이는 모든 상태 변수에 대한 추정이 가능함을 나타낸다.

3. 항법 HILS 시스템

3.1 기본 개념

항법 HILS 기본개념은 외부 가속도를 생성하는 것이다. 실내에서 FMS에 관성항법장치를 장착시켜 구동할 경우 자이로는 각속도, 가속도계는 중력가속도만을 측정한다. 즉, 선형가속도와 원심력 등 외부 가속도 측정은 불가능하다. 이에 보통 HILS 수행 시 관성항법장치는 자세정보만 계산하고 속도나 위치 정보는 운동모델의 출력값을 사용하게 된다. 여기서부터 항법 HILS의 개념은 시작된다. IMU의 출력값은 그대로 사용하고 실시간 처리장치에서 연산하는 6자유도 운동방정식의 출력값을 바탕으로 외부 가속도를 생성한 후, 가속도계 출력값에 더해줌으로써, 실제로는 3축에 대한 회전운동만 하고 있지만 항법장치는 외부 가속도 입력을 받아 스스로 움직이는 것처럼 인식하여 속도, 위치 정보에 대한 연산을 수행한다.

항법좌표계에서의 속도에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\dot{V}^m = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^m + g^n \quad (24)$$

여기서 f^b 는 가속도계에서 측정한 비력을 나타낸다. 즉, 항체 좌표계에서의 가속도를 나타내며, 이는 6자유도 운동방정식의 선형 운동량 보존 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\dot{v} = \Sigma F = mg + F_A + F_T \quad (25)$$

여기서 F_A 는 동유체력에 의한 힘을 나타내고 F_T 는 추력에 의한 힘, mg 는 중력가속도에 대한 힘을 나타낸다. 또한 \dot{v} 은 선형가속도와 회전가속도의 합을 나타내며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{v} = \dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b \quad (26)$$

위 식에서 동유체에 의한 힘과 추력에 의한 힘을 무시하게 되면 다음과 같다.

$$m(\dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b) = \Sigma F = mg \quad (27)$$

$$m(\dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b) - mg = \Sigma F = mf^b \quad (28)$$

여기서 양쪽을 질량(m)으로 나누게 되면

$$\dot{v}^b = \dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b - g \quad (29)$$

$$f^b = \dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b - g^b(\phi, \theta) \quad (30)$$

여기서

$$f^b = [f_x \ f_y \ f_z]^T \quad (31)$$

$$\omega_{ib}^b = [p \ q \ r]^T \quad (32)$$

$$v^b = [u \ v \ w]^T \quad (33)$$

$$g^b(\phi, \theta) = [g \sin\theta \ -g \cos\theta \sin\phi \ -g \cos\theta \cos\phi]^T \quad (34)$$

즉, 항체 좌표계에서 가속도계가 측정하는 값은 중력가속도 이외에 선형가속도와 회전가속도의 합으로 나타나며, 이는 자이로에서 측정하는 각속도와 운동모델에서 계산하는 속도를 이용하여 계산할 수 있다. 최종적으로 가속도계의 출력값은 다음과 같다.

$$\omega_{ib}^b \times v^b = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$f_x = \dot{u} - vr + uq + g \sin\theta \quad (36)$$

$$f_y = \dot{v} + ur - up - g \cos\theta \sin\phi \quad (37)$$

$$f_z = \dot{w} - uq + vq - g \cos\theta \cos\phi \quad (38)$$

3.2 정밀 항법 HILS 시스템

위와 같이 외부 가속도를 생성한 후 가속도계 출력값에 더해 주게 되면 항법장치는 스스로 움직이는 것처럼 인식하여 자세 이외에 속도, 위치 계산도 수행하게 된다. 하지만 이 때 보완해 주어야 할 점이 있다. 먼저 운동모델의 속도정보 및 자이로 각속도를 통하여 외부 가속도(선형가속도, 회전가속도)를 계산하게 되는데 이 때 운동모델의 속도 정보는 이상적인 값으로서 가속도계의 여러 요소가 포함되어 있지 않다. 두 번째로 지구 자전각속도 문제인데 외부 가속도를 추가하여 마치 움직이는 것처럼 항법장치가 연산을 하더라도 실제로는 회전운동만 하는 FMS에 장착되어 있다. 즉, 자이로가 측정하는 지구자전각속도는 위도의 변화에 따라 바뀌어야 하지만, 현재 초기 위치 그대로의 지구자전각속도를 측정하고 있다. 세 번째로 중력가속도 문제인데 이는 위 지구 자전 각속도의 문제와 동일하다. 위도에 따라 중력가속도는 바뀌어야 하지만 실제 가속도계는 현재 위치에 대한 중력가속도를 측정하고 있다. 위도에 따른 지구자전 각속도와 중력가속도의 변화는 운항거리가 길지 않고 국지적으로 수행 시 미세한 변화이지만 최대한 실제환경과 유사하게 외부가속도를 생성하는데 매우 중요한 요소이기 때문에 반드시 고려해야 한다.

최종적으로 가속도계 바이어스, 중력가속도, 지구자전각속도에 대한 보상이 이루어진 항법 HILS 시스템은 Fig. 2와 같다.

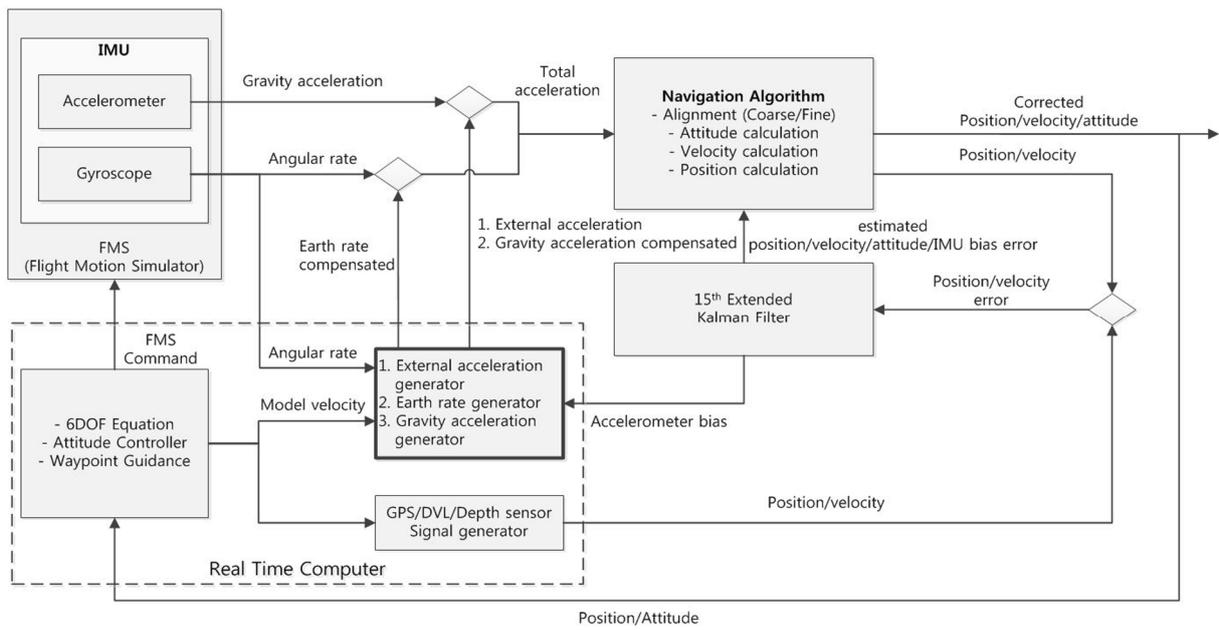


Fig. 2 Advanced Navigation HILLS system

3.3 항법 HILLS 결과

항법 HILLS 시스템 성능 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Mathwork사의 매틀랩을 이용하였고 모든 계산 주기는 100Hz로 계산하였으며, DVL신호는 1Hz로 모델링하였다. 관성항법장치의 자이로 성능은 0.0deg/h, DVL의 성능은 0.0%, 운용속도는 0.0m/s, 총 운용시간은 0.0분이다. 조류에 대한 영향은 무시하였고 DVL은 운항 중 정보가 끊이지 않고 계속 측정된다고 가정하였다(Yoo and Kim, 2013).

몬테카를로 시뮬레이션은 250회 수행하였으며 이 때 위치 오차는 Table 1, Fig. 3, Fig. 4와 같다. 시뮬레이션 결과는 CEP (Circular error probability, 50%), 분산(1σ)과 2σ로 분석하였다. 샘플이 정규분포라고 할 때 분산(1σ)은 평균을 기준으로 전체 샘플의 65%, 2σ는 95%를 차지한다. Fig. 3에서 안쪽 작은 실선 원은 CEP 영역, 가운데 점선 원은 1σ 영역, 바깥쪽 큰 실선 원은 2σ 영역을 나타낸다. 시뮬레이션 후 대형급 탐색용 무인잠수정 시스템에 항법 HILLS 시스템을 적용한 후 총 14회 시험을 수행하였다. 시나리오는 시뮬레이션에서 수행한 것과 같이 동일하게 수행하였고 DVL의 경우 운동모델의 속도정보에 에러요소를 첨가하여 생성하였으며 에러 조건은 시뮬레이션과 동일하다. 항법 HILLS 수행 시 관성항법장치는 초기 자세값을 구하기 위해 자체정렬을 수행하였다. Fig. 5는 항법 HILLS 시스템을 통한 최종적인 가속도계의 출력값을 나타낸다. 실제로는 중력가속도만 측정하고 있지만 모의된 외부 가속도 신호로 인하여 초기 선형가속도 및 회전에 의한 가속도가 추가된 것을 확인할

Table 1 Simulation result of CEP, 1σ and 2σ

| | CEP [m] (50 %) | 1σ [m] (65 %) | 2σ [m] (95 %) |
|----------------|-------------------|------------------|------------------|
| Position error | 83.2318 | 104.5477 | 158.1025 |

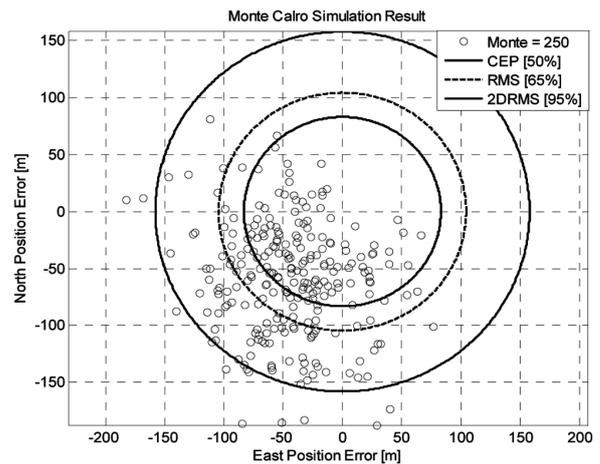


Fig. 3 Monte Carlo Simulation Result [1/2]

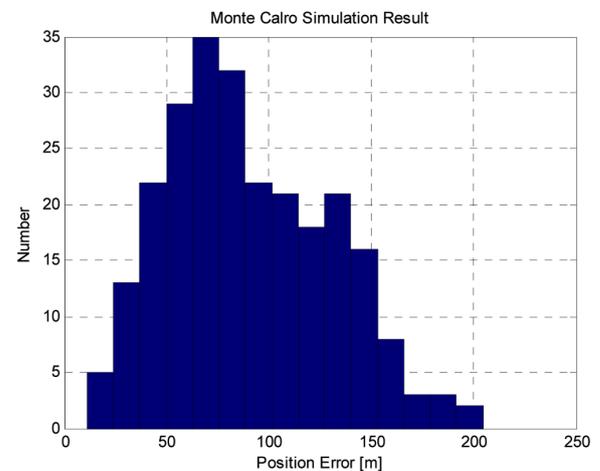


Fig. 4 Monte Carlo Simulation Result [2/2]

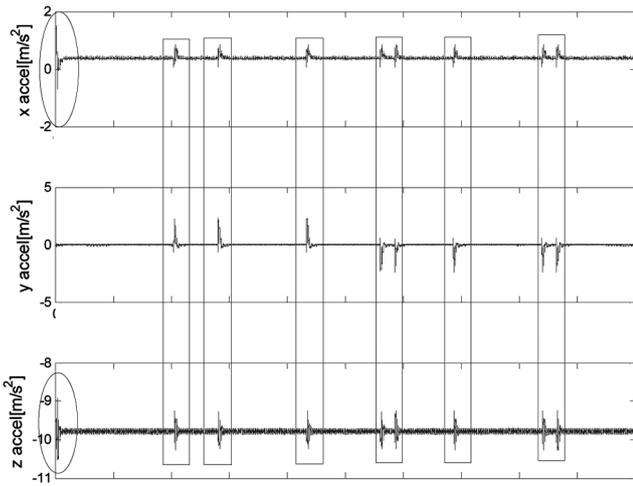


Fig. 5 Aided external acceleration of accelerometer output

Table 2 Navigation Result

| # | Position error [m] | # | Position error [m] |
|---|--------------------|----|--------------------|
| 1 | 87.0436 | 8 | 81.0805 |
| 2 | 101.7074 | 9 | 90.9867 |
| 3 | 92.9724 | 10 | 90.4634 |
| 4 | 173.3435 | 11 | 93.0227 |
| 5 | 97.8923 | 12 | 142.3291 |
| 6 | 84.1071 | 13 | 150.9223 |
| 7 | 104.9865 | 14 | 85.2751 |

수 있다. x, z 축 그래프에 표시된 원 박스는 초기 선형가속도가 추가된 것을 확인할 수 있다. 초기 출항 시 x축 전진방향으로 가장 큰 선형 가속도가 발생되며 시나리오상 초기 출항 시 수 초 뒤에 심도를 바꾸기 때문에 z축 수직방향으로도 추가된 선형 가속도를 확인할 수 있다. 그래프에 표시된 네모 박스는 회전 시 발생하는 회전가속도가 추가된 것을 확인할 수 있으며 전체 시나리오상 8번의 회전을 수행하였다. 회전 시 y축으로 가장 큰 원심력이 작용하고 무인잠수정의 운동특성 상 y축 외 x, z 축에 대한 회전가속도도 추가 된 것을 볼 수 있다. 첨가되는 외부가속도는 단순히 운동모델 정보만 사용한 것이 아니라 실시간으로 지구자전각속도가 보상되는 자이로 출력값, 중력가속도가 보상되는 가속도계값을 바탕으로 계산되어지는 값으로서 보다 더 실제에 가까운 값이다. 최종적으로 선형가속도, 회전가속도, 중력가속도가 합해진 가속도계의 출력값을 이용하여 항법 알고리즘을 연산하였고 이에 대한 위치 오차 결과는 Fig. 6, Table 2에 나타나 있다. 총 14번의 시험을 통한 시험 결과값은 비슷한 위치 오차 경향을 보였고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 Fig. 7에 함께 나타내었다. Fig. 7을 보게 되면 항법 HILS 결과는 총 14회중 10회는 1σ 안에서 형성된 것을 13회는 2σ 안에서 형성된 것을 확인하였다. 시뮬레이션 및 항법 HILS 시험 결과위치 오차가 편향되는 것을 볼 수 있는데 이는 IMU 및 속도 보정장치의 오차요소를 최대치 상수값으로 고정하고 모델

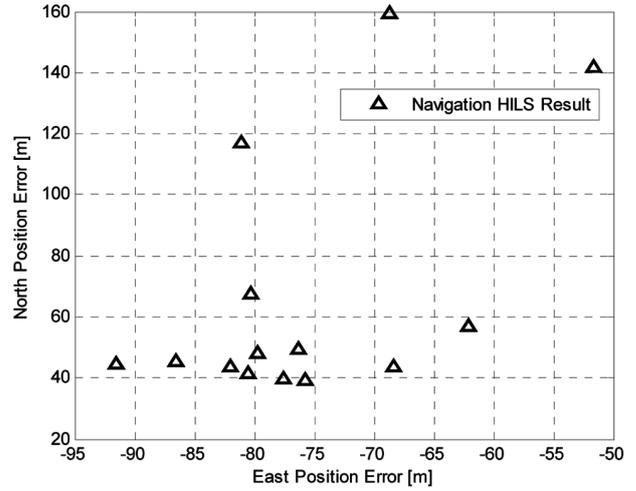


Fig. 6 Navigation HILS Result [1/2]

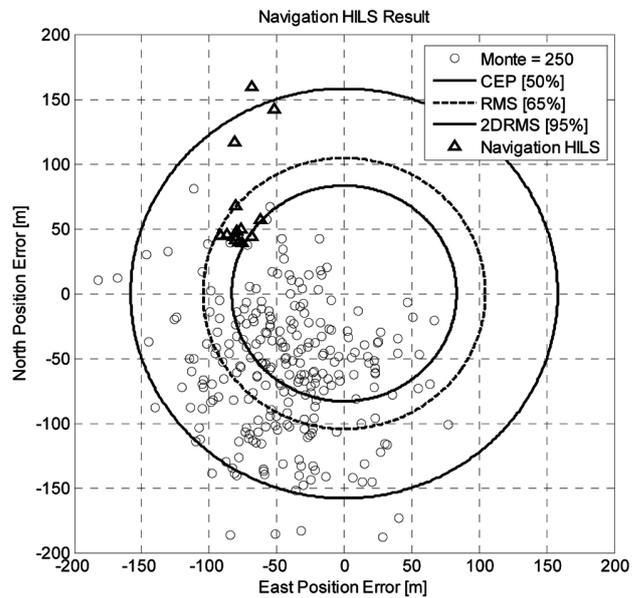


Fig. 7 Navigation HILS Result [2/2]

링 하였기 때문이다. 특히 IMU의 축틀림오차도 한 방향으로 모델링하였기 때문에 편향된 결과를 보인다. 시험의 샘플이 많지는 않지만 확률상 시뮬레이션 결과와 비슷한 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 위치 오차 결과를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 제안된 항법HILS 시스템이 잘 구축되었다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 성능 분석을 위한 항법 HILS 시스템을 제안하였다. 일반적으로 HILS 수행 시 FMS는 육상에 고정되어 있고 회전운동만 하기 때문에 관성항법장치의 가속도계는 중력가속도만 측정한다. 즉, 관성항법장치는 자체값은 출력할 수 있지만 속도, 위치 정보를 계산하

는 것은 불가능하다. 제안된 HILLS 시스템에서는 외부가속도를 생성하여 이러한 단점을 극복하였고 항법장치 관점에서 보게 되면 자이로, 가속도계의 출력값을 그대로 사용하고 외부가속도 정보만 추가되기 때문에 시뮬레이션보다 정확한 항법 결과값을 도출할 수 있었다. 외부 가속도는 단순히 운동모델의 값만 사용하는 것이 아니라 자이로 출력값, 복합항법 필터의 출력값 등 복합적으로 생성하여 실제 환경에 맞게 생성하였다. 또한 무인잠수정의 운동모델을 바탕으로 시험을 수행하여 차량시험에 비해 무인잠수정의 운동특성에 더 가깝게 시험할 수 있었고 최종적으로 실내에서 반복된 실험을 통하여 해상시험 전 시간, 비용을 절감할 수 있었다. 최종적인 항법 결과는 시뮬레이션 결과와 비교하여 최종 위치 오차에 대한 타당성을 검증하였다.

추후 과제로는 항법성능 분석 결과를 바탕으로 대형급 탐색용 무인잠수정의 항법 성능에 의하여 복합적인 영향을 미치는 전지, 추진체, 통신장비 등의 효과도 분석을 통하여 최종적으로 대형급 탐색용 무인잠수정 구성품의 선정을 수행하고 이 후, 실험역 시험을 통하여 최종적인 성능 평가 수행을 실시할 예정이다.

References

- Hwang, J.H., Park, Kin, M.H., Lee, S.Y., Hong, S.K., 2013. Depth Controller Design using Fuzzy Gain Scheduling Method of a Autonomous Underwater Vehicle - Verification by HILLS. *Journal of Institute Control, Robotics and Systems*, 19(9), 791-796.
- Lee, P.M., Jeon, B.H., Kim, S.M., Lee, J.M., Lim, Y.K., Yang, S.I., 2004. A Hybrid Navigation System for Underwater Unmanned Vehicles, Using a Range Sonar. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(4), 33-39.
- Lee, J.M., Lee, P.M., Kim, S.M., Hong, S.W., SEO, J.W., Seong, W.J., 2003b. Rotating Arm Test for Assessment of an Underwater Hybrid Navigation System for a Semi-Autonomous Underwater Vehicle, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(4), 73-80.
- Lee, J.M., Lee, P.M., Seong, W.J., 2003a. Underwater Hybrid Navigation Algorithm Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using an Indirect Feedback Kalman Filter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(6), 83-90.
- Titterton, D.H., Weston, J.L., 1997. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. Peter Pegerinus, London.
- Wanli, L., Jinling, W., Liangqing, L., Wenqi, W., 2013. A Novel Scheme for DVL-Aided SINS In-Motion Alignment Using UKF Techniques. *Sensors*, 13, 1046-1063.
- Yanrui, G., Ricardo, M., Joao, S., 2010. Accuracy Analysis of DVL/IMU/Magnetometer Integrated Navigation System using Different IMUs in AUV. 8th IEEE International Conference on Control and Automation (IEEE ICCA 2010), Xiamen, China, 516-521.
- Yoo, T.S., Chung, G.P., Yoon, S.I., 2013. Development of Integrated Navigation Algorithm for Underwater Vehicle using Velocity Filter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(2), 93-99.
- Yoo, T.S., Kim, M.H. 2014. Analysis of Integrated Navigation Performance for Sensor Selection of Unmanned Underwater Vehicle(UUV). *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(6), 566-573.