JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 24, No. 11: 1417~1423, Nov. 2020

무인잠수정의 경로점 유도 법칙 설계 및 HILS 검증

황종현[1*] · 유태석[1] · 한용수[2] · 김현욱[1]

Development of AUV's Waypoint Guidance Law and Verification by HILS

Jong-Hyon Hwang[1*] · Tae-Suk Yoo[1] · Yongsu Han[2] · Hyun Wook Kim[1]

[1*]Research Engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co., Ltd, Seongnam, 13488 Korea
[2]Research Engineer, Global Business Development, LIG Nex1 Co., Ltd, Seongnam, 13488 Korea

요 약

본 논문에서는 수중에서 운동하는 무인잠수정의 경로점 유도법칙을 제안한다. 시선각 유도법칙과 수선경로 오차를 줄여가는 경로추종 유도법칙을 조합하여 효과적인 경로점 유도법칙을 설계하였고, 수선경로 오차의 거리에 따라 제어이득을 변화시켜 시스템의 안정성을 증가시켰다. 또한, 관성항법장치와 도플러속도계를 이용한 복합항법 시스템의 성능을 확인할 수 있는 HILS를 구성하였다. 같은 경로점 및 목표점을 입력 후 HILS 수행결과와 실해역 주행시험 결과를 비교하여, 제안한 유도법칙 및 HILS가 올바르게 구성되어 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a waypoint guidance algorithm for the Autonomous Underwater Vehicle(AUV). The proposed simplified guidance algorithm is presented, which is combined LOS guidance and cross-track guidance for path following. Cross-track error is calculated using the position of the AUV and reference path. LOS guidance and cross-track guidance are appropriately changed according to cross-track error. And the stability of the system has been improved using variable cross-track control gain by cross-track error. Also, in this paper, navigation hardware in-the loop simulation(HILS) is implemented to verify navigation algorithm of AUV that performs combined navigation using inertial navigation device and doppler velocity log(DVL). Finally, we design integrated system HILS (including navigation HILS) for performance verification of guidance algorithm of the autonomous underwater vehicle. By comparing the sea test result with HILS result, the proposed guidance algorithm and HILS configuration were confirmed be correct.

키워드 : 자율무인잠수정, 경로점 유도, 실물모의시험, 시선각

Keywords : AUV(Autonomous Unmanned Vehicle), Waypoint guidance, HILS(Hardware In-the Loop Simulation), LOS(Line Of Sight)

Received 13 September 2020, **Revised** 23 September 2020, **Accepted** 2 October 2020

*** Corresponding Author** Jong-Hyon Hwang(E-mail:jonghyon.hwang@lignex1.com, Tel:+82-31-8026-4370)
Research Engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co., Ltd, Seongnam, 13488 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.11.1417 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

자율무인잠수정(AUV : Autonomous Underwater Vehicle)은 스스로의 동력원을 가지고 인간의 개입을 최소화한 상태로 주어진 임무를 수행하는 수중 운동체이다. 최근, 이러한 AUV는 감시/정찰, 기뢰탐지, 유도무기 등과 같은 군사적 목적뿐만 아니라 심해 지형 탐사, 광물탐사, 해양 구조물 조사와 같은 민수용 목적으로의 활용도가 높아 지속적으로 관심이 증대되고 있다[1-3].

수중에서 외부의 조작 없이 주어진 임무를 수행해야 하는 자율무인잠수정은 스스로 위치 및 자세를 제어할 수 있는 유도항법제어(GNC : Guidance, Navigation, and Control) 시스템의 개발이 필수적이다.

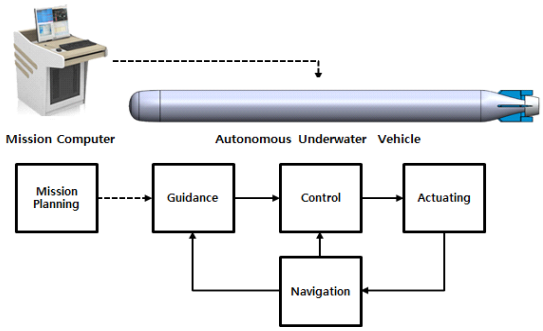

Fig. 1 Configuration of AUV's guidance, navigation and control

그림 1은 무인잠수정의 유도항법제어 시스템의 구성도이다. 주행계획을 미션 컴퓨터에서 입력하면, 무인잠수정 내부의 임무 수행을 위한 유도명령 및 제어입력을 생성하고, 생성된 제어입력에 의한 구동타의 움직임으로 인해 무인잠수정이 이동하게 된다. 무인잠수정의 이동에 의한 움직임은 항법시스템을 통하여 측정 및 계산되며, 생성된 항법 정보는 다시 유도 명령 생성 및 제어입력 생성을 위하여 피드백되는 구조를 갖는다.

미리 입력된 경로점을 추종해야 하는 무인잠수정의 경로점 유도법칙중 대표적인 것은 시선각 유도(LOS : line of sight) 방법이다. Fossen은 선박 항해시 경로점 정보를 데이터 베이스화하여 그 정보를 이용한 경로점 유도 시스템을 제안하였다. 또한 현재 선박의 위치와 경로점 사이의 임의의 목표점을 추종하도록 하는 가시선 벡터를 이용한 유도 시스템을 제안하였다[4,5]. 본 논문에서는 일반적인 시선각 유도 법칙을 기반으로 경로추종 유도(Path-following guidance) 방법을 일부 추가하여 Fossen이 제안한 방법과 유사하지만 좀 더 간단한 구조의 경로점 유도 법칙을 설계하였다. 경로추종 유도를 위해 수선경로오차(Cross-track error)를 계산하여 이를 제거하는 유도법칙으로 설계하였다[6].

유도 법칙 설계를 위해 무인잠수정의 수학적 모델링 및 선형화를 통한 자세제어기 설계를 선행하였으며[7], 유도 법칙 설계 후에는 HILS 및 해상시험을 통하여 그 성능을 검증하였다. HILS는 하드웨어 환경을 보존한 상태에서 무인잠수정 동역학의 전체 혹은 일부분을 수학적 모델로 대체하는 실시간 실물 모의시험을 의미한다[6,8]. HILS를 수행하여 무인잠수정의 유도제어 알고리즘 및 실물에 탑재된 소프트웨어의 성능을 확인할 수 있을 뿐 아니라, 체계 전체의 성능을 검증하고 실제 시험에서의 위험요소를 제어하는 등 시스템 전체의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

Ⅱ. 수중운동체 모델링

2.1. 운동방정식

무인잠수정의 자세/심도 제어기 및 경로점 유도 알고리즘 설계를 위해서는 먼저 수학적 모델링이 선행되어야 한다. 수학적 모델링을 위해 사용된 좌표계는 그림 2와 같이 동체고정좌표계와 관성좌표계이다. 동체고정좌표계에서는 무인잠수정의 선속도 및 각속도를 표현하고, 관성좌표계에서는 무인잠수정의 오일러각 및 위치를 표현한다.

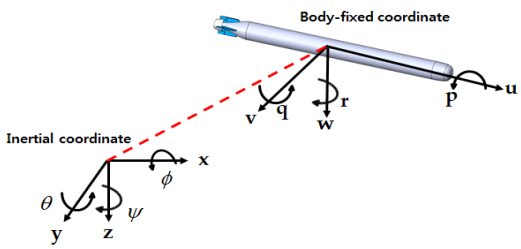

Fig. 2 Coordinate of AUV

한편, 무인잠수정은 뉴턴의 제2법칙 및 이동정리를 이용하여 식 (1)~(6)과 같은 6자유도 비선형 운동방정식

으로 나타낼 수 있다[4]. 이때, 좌항의 m은 무인잠수정의 질량, W는 무게, B는 부력, x_g, y_g, z_g는 무게중심과 부력중심과의 거리, $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$는 각 축의 MOI(Moment of Inertia)를 나타낸다. 또한, 우항의 X, Y, Z, K, L, N은 각 좌표축에 작용하는 외력이며, 아래첨자 H, S, P, δ 는 각각 동유체력, 중력 및 정유체력, 추진 및 토크, 제어판에 의한 힘을 나타낸다. 조종미계수 및 안정미계수들은 수조모형시험 및 전산유체역학(CFD : Compitatoinal Fluid Dynamic)을 이용하여 구하였다.

$$m[\dot{u}+qw-vr-x_g(q^2+r^2)+y_g(pq-\dot{r})+z_g(pr+\dot{q})] = X_H+X_S+X_P+X_\delta \quad (1)$$

$$m[\dot{v}+ur-pw+x_g(pq+\dot{r})-y_g(p^2+r^2)+z_g(qr-\dot{p})] = Y_H+Y_S+Y_P+Y_\delta \quad (2)$$

$$m[\dot{w}+vp-uq+x_g(pr-\dot{q})+y_g(qr+\dot{p})-z_g(p^2+q^2)] = Z_H+Z_S+Z_P+Z_\delta \quad (3)$$

$$I_{xx}\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr+I_{xy}(pr-\dot{q})-I_{xz}(\dot{r}+pq) + I_{yz}(r^2-q^2)+m[y_g(\dot{w}+pv-qu)-z_g(\dot{v}+ru-pw)] = K_H+K_S+K_T+K_\delta \quad (4)$$

$$I_{yy}\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})pr-I_{xy}(qr+\dot{p})-I_{xz}(p^2-r^2) + I_{yz}(pq-r^2)+m[z_g(\dot{u}+qw-rv)-x_g(\dot{w}-qu+pv)] = M_H+M_S+M_P+M_\delta \quad (5)$$

$$I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq+I_{xy}(q^2-p^2)+I_{xz}(qr-\dot{p}) - I_{yz}(pr+\dot{q})+m[x_g(\dot{v}+ru-pw)-y_g(\dot{u}+qw-rv)] = N_H+N_S+N_P+N_\delta \quad (6)$$

동체고정좌표계와 관성좌표계간의 항법방정식은 아래의 식 (7)~(10)과 같다. 이때, s는 sin을, c는 cos을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta\\ 0 & c\phi & -s\phi\\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\dot{x}=(c\theta c\psi)u+(s\phi s\theta c\psi-c\phi s\psi)v+(c\phi s\theta c\psi+s\phi s\psi)w \quad (8)$$

$$\dot{y}=(c\theta s\psi)u+(s\phi s\theta s\psi+c\phi c\psi)v+(c\phi s\theta s\psi-s\phi c\psi)w \quad (9)$$

$$\dot{z}=(-s\theta)u+(s\phi c\psi)v+(c\phi c\theta)w \quad (10)$$

2.2. 선형화 및 상태공간 표현

비선형 시스템인 무인잠수정의 제어기 설계를 위하여 운동방정식의 선형방정식으로 단순화 하여야 한다. 운동속도는 명령속도에 수렴한 상태에서 평형상태를 가정하고, 테일러 1차급수를 이용하여 식 (11)과 같은 형태의 선형방정식을 도출할 수 있으며, 이를 이용하여 종방향과 횡방향으로 나누어 상태공간방정식을 유도할 수 있다[4].

$$\dot{x} = Ax + Bu \qquad y = Cx \quad (11)$$

종방향 및 횡방향의 상태변수를 각각 w, q, θ, z와 v, p, r, ϕ, ψ로 하고, 입력변수는 각각 δ_e 및 δ_r, δ_ϕ로 하여 다시 풀어쓰면 아래의 식 (12),(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix}(m-Z_{\dot{w}}) & -Z_q & 0 & 0\\ -M_{\dot{w}} & (I_{yy}-M_{\dot{q}}) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{w}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{z}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}Z_w & mu_0+Z_q & -(W-B)s\theta_0 & 0\\ M_w & M_q & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & -u_0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Z_{\delta_e}\\ M_{\delta_e}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\delta_e \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix}(m-Y_{\dot{v}}) & 0 & -Y_{\dot{r}} & 0 & 0\\ 0 & (I_{xx}-K_{\dot{p}}) & 0 & 0 & 0\\ -N_{\dot{v}} & 0 & (I_{yy}-N_{\dot{r}}) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{v}\\ \dot{p}\\ \dot{r}\\ \dot{\phi}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}Y_v & mw_0 & Y_r-\mu_0 & (W-B)c\theta_0 & 0\\ 0 & K_p & 0 & 0 & 0\\ N_v & 0 & N_r & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ p\\ r\\ \phi\\ \psi\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Y_{\delta_r} & 0\\ 0 & K_{\delta_\phi}\\ N_{\delta_r} & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_r\\ \delta_\phi\end{bmatrix} \quad (13)$$

Ⅲ. 경로점유도법칙 설계

3.1. 자세제어기 설계

종방향과 횡방향으로 구분된 상태공간방정식을 이용하여 각 입력에 대한 심도, 롤, 헤딩에 대한 전달함수를 구현할 수 있으며, 근궤적법을 이용하여 다중루프 구조의 자세 및 심도 제어기를 설계하였다. 심도제어는 피치각속도(q) 및 피치각(θ)를 내부루프로 피드백하여 안정성을 증대시켰고, 심도(z)를 외부루프로 피드백하여 명령을 추종할 수 있도록 설계하였다. 롤 및 헤딩은 각각의 롤각속도(p), 헤딩각속도(r)를 내부루프로, 롤(ϕ)각 및 헤딩(ψ)각을 외부루프로 피드백하는 구조로 제어기

를 설계하였다. 기본적으로 근궤적법을 확장시켜가며 제어기를 설계하는 구조이기 때문에 시스템의 안정성을 증대시키기 위한 제어 이득의 튜닝이 매우 용이하며, 이득 변경에 대한 제어 성능을 예측하기도 쉽다[7]. 제어기의 구조 및 제어법칙은 아래의 그림 3 및 식(14)~(16)과 같다.

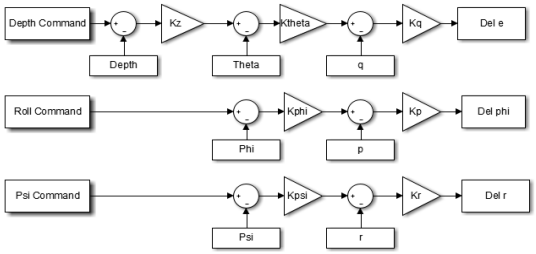

Fig. 3 Block diagram of attitude controller

$$\delta_e = K_z K_\theta K_q (Z_{com} - Z) - K_\theta K_q \theta - K_q q \tag{14}$$

$$\delta_{r1} = K_\psi K_r (\psi_{com} - \psi) - K_r r \tag{15}$$

$$\delta_\phi = K_\phi K_p (\phi_{com} - \phi) - K_p p \tag{16}$$

3.2. 경로점유도

본 논문에서는 시선각 유도법칙과 경로추종 유도법칙을 접목시켜, 구조는 매우 간단하면서도 경로점을 잘 추종할 수 있는 유도 법칙을 설계하였다.

시선각 유도법칙 및 경로추종 유도법칙의 개념은 아래의 그림 4와 같다.

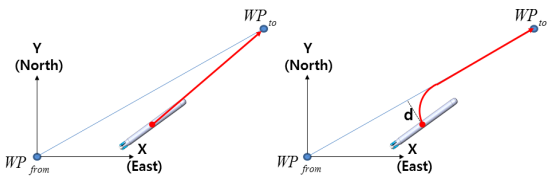

Fig. 4 LOS guidance(left) and Cross-track guidance(right)

시선각 유도법칙은 현재 AUV의 위치와 목표 경로점 간의 가시선 방위각을 유도명령으로 생성하여 추종하는 유도 법칙을 말한다. 현재 AUV의 위치를 x, y라 하고 목표 경로점의 위치를 x_t, y_t라 하면 이때의 침로 유도 명령은 식(17)과 같다.

$$\psi_{LOS} = \tan^{-1}((x_t - x)/(y_t - y)) \tag{17}$$

한편, 경로추종 유도는 수선경로오차(Cross-track error, d)를 최소화 시키는 제어기법을 설계하였다. 수선경로오차는 출발점과 목표점의 방위각 차이(ψ_{leg})와 현재위치와 목표점과의 방위각차이(ψ_v)를 이용하여 구하는 방법, 출발점과 목표점의 방위각 차이와 출발점과 현재위치와의 상관관계를 이용한 방법, 삼각형의 넓이와 벡터의 외적을 이용한 방법 등으로 구할 수 있다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 첫 번째 방법을 이용하여 식(18)~(20)에 의해 수선경로오차(d)를 구하였다.

$$\psi_{leg} = \tan^{-1}((x_t - x_f)/(y_t - y_f)) \tag{18}$$

$$\psi_v = \tan^{-1}((x_t - x)/(y_t - y)) \tag{19}$$

$$d = \sqrt{(x_t - x)^2 + (y_t - y)^2} \times \sin(\psi_{leg} - \psi_v) \tag{20}$$

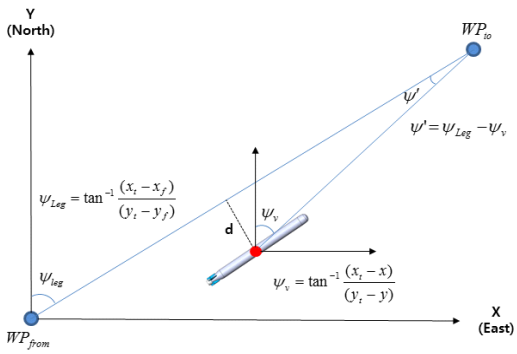

Fig. 5 Cross-track Error Calculation

위에서 설계된 시선각 유도법칙 및 경로추종 유도법칙은 아래의 그림 6과 같은 조건으로 접목하였다.

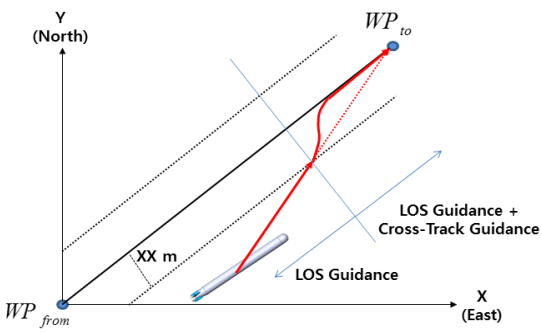

Fig. 6 Guidance logic for AUV

수선경로 오차가 기준경로 대비 일정 거리를 벗어나면 시선각 유도 법칙만 적용하고, 그 외에는 시선각 유도와 경로추종 유도를 병합하여 기준경로를 추종할 수 있도록 하였다. 수선경로 오차가 일정거리 이상 벗어나면 시선각 유도 법칙만을 적용한 이유는 항법 센서의 비정상값에 의한 과도한 제어명령 생성을 막아줄 수 있기 때문이다. 또한, 기준경로에 근접해오면, K_d를 거리에 반비례하도록 감소시켜 제어기의 안정성을 증가시키는 효과를 나타낼 수 있도록 하였다.

유도법칙을 포함한 최종적인 침로방향의 제어 입력은 아래의 식 (21)과 같다.

$$\delta_r = K_d d + \delta_{r1} = K_d d + K_\psi K_r (\psi_\nu - \psi) - K_r r \tag{21}$$

경로점에 대한 통과여부 판단은 AUV의 횡운동성능에 의한 회전반경을 고려하여 설정하였으며, 경로점 통과시 다음경로점 혹은 목표점을 향해 경로를 갱신한다.

Ⅳ. HILS 구현 및 검증

4.1. 기본 HILS 구성

HILS는 하드웨어 환경을 보존한 상태에서 AUV 동역학의 전체 혹은 일부분을 수학적 모델로 대체하는 실시간 실물 모의시험을 의미한다.

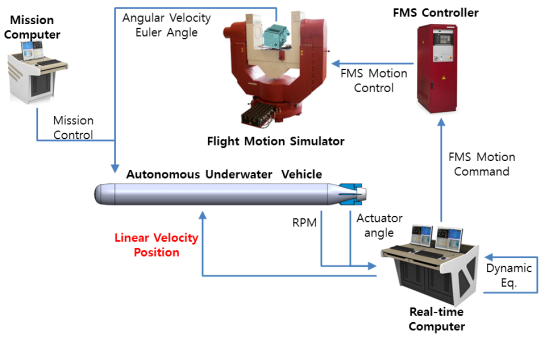

Fig. 7 Configuration of HILS

HILS 구성은 그림 7과 같다. 미션 컴퓨터에서 경로점 및 초기 심도 등의 환경을 입력하고 주행을 시작하면 무인잠수정의 유도제어부 및 구동부에서는 구동 RPM 및 제어타각을 실시간 컴퓨터로 전송하게 된다. 실시간 컴퓨터에서는 AUV의 수학 모델링에 의해 가속도, 각속도, 속도, 위치 등을 계산하고 계산된 각속도를 3축 운동모의기(FMS : flight motion simulator)로 전송한다. 3축 운동모의기는 각속도 명령에 의해 구동되며, 관성항법장치는 이를 인식하여 자세를 재계산하게 된다. AUV에서는 계산된 자세 및 각속도를 피드백하고 제어입력을 계산 하는 폐루프 구조를 갖는다.

HILS를 수행하여 AUV의 유도제어 알고리즘 및 실물에 탑재된 소프트웨어의 성능을 확인할 수 있을 뿐 아니라, 체계 전체의 성능을 검증하고 실제 시험에서의 위험요소를 제어하는 등 시스템 전체의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

일반적인 HILS 구성에서 위치는 실시간 컴퓨터에서 계산된 값을 사용하게 된다. 하지만, 실제 AUV는 움직임에 따른 가속도 및 각속도, 보조항법장치인 속도보정장치에서 측정되는 속도를 입력받아 위치를 계산하게 된다. 따라서 HILS에서는 관성항법장치의 위치계산에 관련된 기능 및 성능을 검증할 수 없게 된다.

본 논문에서는 관성항법장치의 항법컴퓨터 연산에 의한 하드웨어적인 요소를 확인하기 위하여 항법 HILS를 함께 구현하였다.

4.2. 항법 HILS 구성

항법 HILS 기본개념은 아래의 그림 8과 같이 외부 가속도를 생성하는 것이다. 실내에서 운동모의기에 관성항법장치를 장착시켜 구동할 경우 자이로는 각속도, 가속도계는 중력가속도만을 측정한다. 즉, 선형가속도와 원심력 등 외부 가속도 측정은 불가능하다.

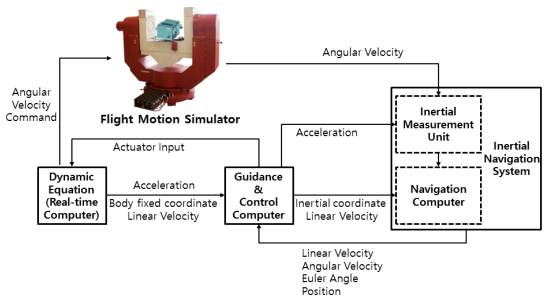

Fig. 8 Configuration of Navigation HILS

일반적인 HILS 수행 시 관성항법장치는 자세만 측정하고 나머지 속도나 위치 정보는 실시간 컴퓨터에서 계산된 운동모델의 정보를 사용하게 된다. 여기서부터 항

법 HILS 의 개념은 시작된다. 기본적으로 관성항법장치의 출력값은 그대로 사용하고 실시간 컴퓨터에서 연산하는 6자유도 운동방정식의 출력값을 바탕으로 자이로 출력값, 복합항법 필터 상태변수 값 등을 연산하여 외부 가속도를 생성한 후, 가속도계 출력값에 더해줌으로써, 실제로는 3축에 대한 회전운동을 하지만 항법장치는 움직이는 것처럼 외부 가속도 입력을 받아 연산을 수행한다[9,10]. 최종적으로 유도제어 로직에 피드백 되는 값은 관성항법장치의 출력값이다.

4.3. 검증

미션 컴퓨터에서 경로점 및 목표점을 입력하여 HILS를 수행한 결과와, 동일 좌표를 입력하여 실해역에서의 주행시험 결과를 비교하였다.

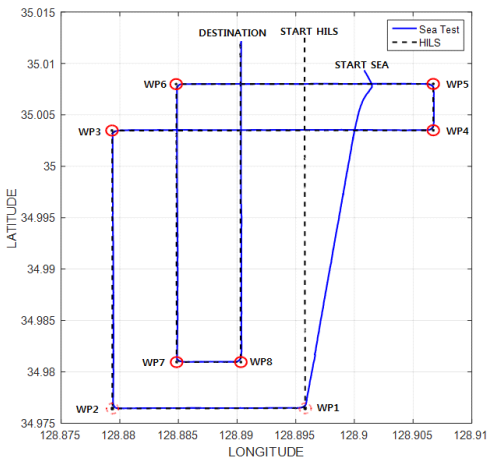

Fig. 9 HILS vs. Sea Test Result (Position)

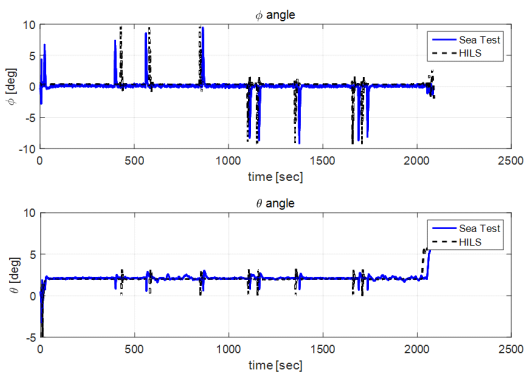

Fig. 10 HILS vs. Sea Test Result (Attitude)

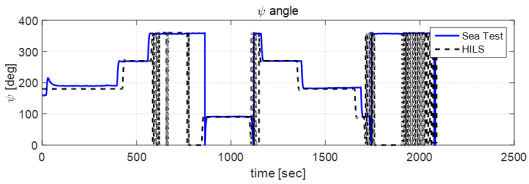

Fig. 11 HILS vs. Sea Test Result (Heading)

그림 9는 출발위치(START HILS, START SEA)에서부터 경로점(WP1~8)을 지나 목표점(DESTINATIO N)까지의 위치를 도식화 한 것이다. 출발 위치에 따른 WP1까지의 주행 각도 및 도달시간에 의한 자세 및 침로상의 시간차이만 있을 뿐, WP1 통과 이후에는 HILS 결과와 해상시험의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다.

그림 10, 11은 각각 자세(ϕ,θ)와 방위각(ψ)에 대한 HILS 수행 결과와 해상시험 결과를 비교한 것이다. 이를 통하여 유도 법칙에 의한 자세제어가 잘 이루어졌을 뿐 아니라 수학적 모델링도 정확하게 이루어졌음을 알 수 있다.

이는 잘 계산된 수학적 운동모델 뿐만 아니라 하드웨어 적인 요소까지 고려된 HILS를 구현하였음을 의미하며, 알고리즘 변화 및 하드웨어적인 성능 변경 시 HILS를 수행하여 주행에 미치는 영향을 바로 예측할 수 있음을 의미한다. 또한 이렇게 해상시험 결과와 HILS결과를 비교함으로써 수학적 운동모델의 유체력 계수 등을 갱신할 수 있으며, 신뢰성을 향상 시키는데 도움을 줄 수 있다. 이렇게 증명된 HILS 구현을 통해 예상치 못한 하드웨어적인 오류를 수정할 수 있고, 또한 시험 비용 및 횟수를 획기적으로 줄일 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 AUV의 수학적 운동모델 및 자세제어기 를 설계한 후 시선각 유도 법칙과 경로추종 유도법칙을 적절히 분배하여 경로점 유도법칙을 설계하였다. 설계된 유도 법칙의 검증을 위해 항법 알고리즘 검증을 포함하는 HILS를 구축하였으며, 해상시험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 향후 구현된 HILS를 통해 수중운동체의 다양한 주행 알고리즘 및 항법 알고리즘을 검증할 수 있다. 특히, 장시간 운용에 대비한 최적 유도기법 및 제어기법을 적용한 연구를 수행할 예정이다.

REFERENCES

[1] J. Yuh, "Design and Controlled Autonomous Underwater Robots : A Survey," *Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, Autonomous Robots*, pp. 7-24, 2000.

[2] C. G. Lee, J. W. Jang, and J. H. Kim, "Stochastic Model Predictive Control for Motion Control of an Underactuated Underwater Vehicle," *Journal of Institude of Control, Robotics and Systems*, vol. 26, no. 5, pp. 373-378, 2020.

[3] J. H. Moon, H. J. Lee, M. H. Kim, H. G. Park, and T. Y. Kim, "T-S Fuzzy Model-Based H_-/H_∞ Fault Detection of Larger Displacement Unmanned Underwater Vehicle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 172-178, 2017.

[4] T. I. Fossen, *Guidance and Control od Ocean Vehicle*, Jhon Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1994.

[5] M. Breivik and T. I. Fossen, "Line-of-sight path following for marine surface vessels," *Proc. of the IFAC*, 2004

[6] S. H. Baek and S. K. Hong, "A Study on Flight Trajectory Generations and Guidance/Control Laws: Validation through HILS," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 12, pp. 1238-1243, 2008.

[7] J. H. Hwang, S. W. Park, M. H. Kim, S. Y. Lee, and S. K. Hong "Depth Controller Design using Fuzzy Gain Scheduling Method of a Autonomous Underwater Vehicle – Verification by HILS," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 9, pp. 791-796, 2013.

[8] J. S. Choi and Y. S. Lee, "The Implementation of a Hardware-In-The-Loop Simulator for an Inverted Pendulum System Using Open-Source Hardware," *Journal of Institude of Control, Robotics and Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 117-125, 2017.

[9] T. S. Yoo, M. H. Kim, J. H. Hwang, and S. I. Yoon, "Development of Navigation HILS System for Integrated Navigation Performance Analysis of Large Diameter Unmanned Underwater Vehicle," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 30, no. 5, pp. 367-373, 2016.

[10] P. M. Lee, H. W. Shim, H. Baek, B. H. Kim, J. Y. Park, B. H. Jun, and S. Y. Yoo, "Navigation System for a Deep-sea ROV Fusing USBL, DVL, ang Heading Measurements," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 315-323, 2017.

황종현(Jong-Hyon Hwang)

2007년 세종대학교 항공우주공학과(공학사)
2009년 세종대학교 항공우주공학과(공학석사)
2012년 세종대학교 항공우주공학과(박사수료)
2012년 ~ LIG넥스원 해양연구소 선임연구원
※관심분야 : 무인시스템의 유도항법 및 제어

유태석(Tae-Suk Yoo)

2010년 세종대학교 항공우주공학과(공학사)
2012년 세종대학교 항공우주공학과(공학석사)
2012년 ~ LIG넥스원 해양연구소 선임연구원
※관심분야 : 관성센서, 관성항법, 수중복합항법

한용수(Yongsu Han)

2004년 세종대학교 항공우주공학과(공학사)
2006년 서울대학교 항공우주공학과(공학석사)
2012년 서울대학교 항공우주공학과(공학박사)
2012년 ~ LIG넥스원 해외사업개발단 수석연구원
※관심분야 : 무인시스템 M&S

김현욱(Hyun Wook Kim)

2009년 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학사)
2012년 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학석사)
2012년 ~ LIG넥스원 해양연구소 수석연구원
※관심분야 : 무인시스템의 지능제어