



# 초대형급 무인잠수정의 현장통합 HILS 설계 및 개발

김진순<sup>†</sup>  
국방과학연구소

## Design and Development of a Hardware-in-the-loop Simulation for Site Integration Testing of an Extra-large Unmanned Underwater Vehicle

Jin Sun Kim<sup>†</sup>  
Agency for Defense Development

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

An extra-large unmanned underwater vehicle (XLUUV) is designed to perform various long-term missions autonomously. Because the size and weight of its subsystems exceed the capacity of laboratory testing, assembly tests beyond the subsystem level must be conducted in large facilities such as shipyards. When the XLUUV enters the subsystem assembly stage, a hardware-in-the-loop simulation (HILS) in a laboratory becomes highly limited. So the assembly, which is carried out through restricted testing and verification in large facilities such as shipyards, becomes a factor that increases risk factors in sea trials. This paper presents the design and development of HILS for site integration testing of the XLUUV during the assembly stage in large facilities such as shipyards, not in a laboratory.

**Keywords** : Extra-large unmanned underwater vehicle(XLUUV: 초대형급 무인잠수정), Hardware-in-the-loop simulation(HILS), Site integration testing(현장통합시험), Hardware(HW), Software(SW), Remote control system(RCS: 원격통제장비)

### 1. 서론

무인 자율 수중운동체를 개발하는 과정에서 실제 시험의 위험 요소를 사전에 확인하고 각종 설계 변수들을 최적화함으로써 개발 기간과 비용을 절감하기 위한 HILS 기법이 적용되고 있으며, HILS 시험을 통해 각 부체계(subsystem)의 하드웨어(HW) 및 소프트웨어(SW)를 종합적으로 검증한 후 조립/검증 단계를 수행한다 (Park et al., 1999; Nam, 2002; Montelo and Furukawa, 2010).

실험실에서 시험/검증/조립이 가능한 무인 자율 수중운동체는 부체계 단위 시험, 부체계 연동 시험, 체계 연동 시험, HILS 시험, 해상 시험 등의 과정을 통해 성능을 검증한다. 부체계 단위 시험에서는 부체계 구성 장비의 성능이 요구사항을 만족하는지를 검증하고, 부체계 연동 시험을 통해 각 부체계 간의 연동 기능을 검증한다. 부체계 연동 시험이 완료되면 체계 연동 시험을 통해 체계 전반의 연동 기능을 검증하고, 수중운동체의 성능(HW/SW)을 종합적으로 확인하기 위한 HILS 시험을 수행한다. 실험실 환경에서 HILS 시험을 수행하기 위해 실시간처리장치(real-time computer), FMS(flight motion simulator), 부체계 모니터링 장비, 부체계 시뮬레이터 등으로 환경을 구성한다(Hwang et al., 2012;

Jung and Oh, 2012; Hyun, 2013; Saho and Feng, 2019). 무인 자율 수중운동체의 제어부에서 생성된 제어 명령 및 상태 정보는 실시간처리장치로 전송되며 이를 기반으로 6자유도 운동방정식을 실시간으로 계산한다. 6자유도 운동방정식의 계산 결과는 3축 FMS에 전달되어 물리적 회전운동을 생성하고 이를 통해 관성항법장치에 실제와 유사한 운동 환경을 제공한다. 또한 실시간 처리장치는 부체계 시뮬레이터를 제어하여 생성된 부체계 모의 데이터를 무인 자율 수중운동체에 전송한다. HILS 시험을 통해 해상 시험에서 수행할 임무 계획을 실행하여 각 부체계의 HW와 SW가 정상적으로 동작하는지 검증함으로써 해상 시험에서의 위험 요소를 사전에 확인하고 각 부체계의 로직(logic)과 파라미터(parameter) 등을 최적화할 수 있다. HILS 시험이 완료되면 수중운동체를 조립하여 실제 해상 시험을 통하여 수중운동체의 성능을 검증한다.

다양한 임무를 장시간 자율적으로 수행하기 위한 초대형급 무인잠수정(XLUUV)은 각 부체계의 크기와 종류가 실험실에서 시험/검증할 수 있는 수준을 벗어나기 때문에 부체계 단위 이상의 조립/검증을 조선소 등의 대형 공장에서 수행해야 하는 제한점이 발생한다.

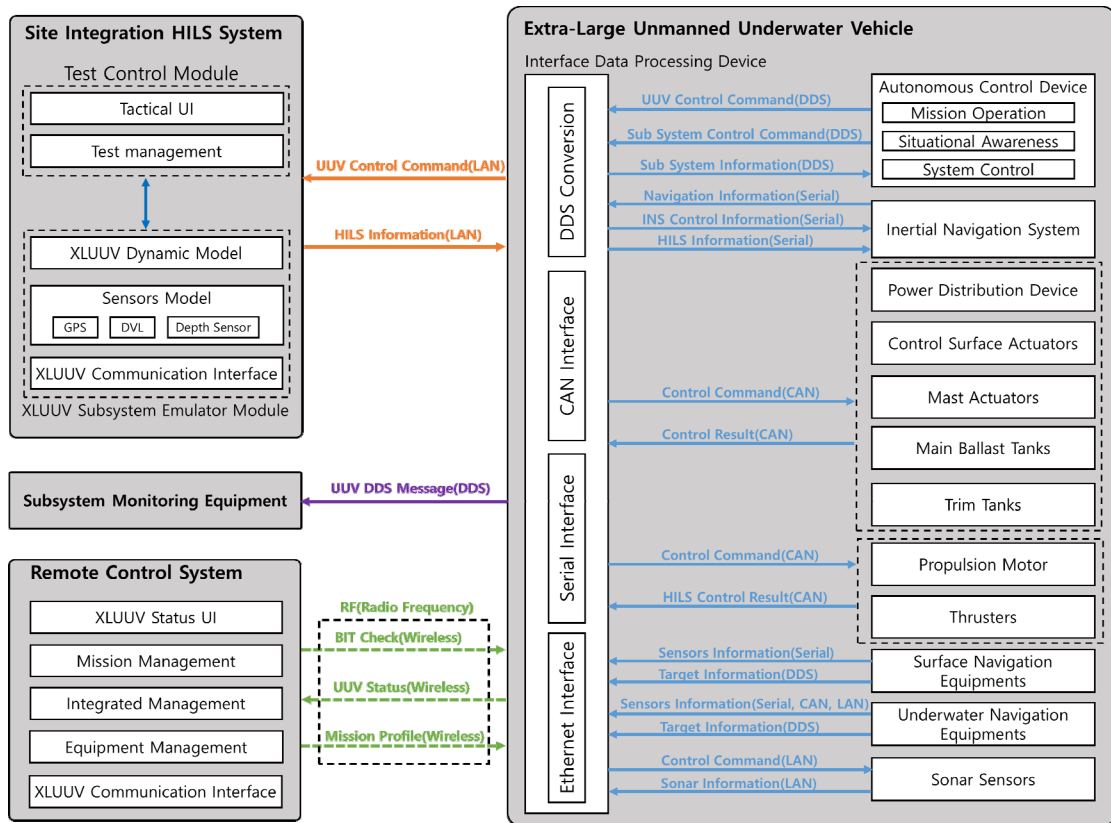


Fig. 1 Interface of the site Integration HILS for the XLUUV

XLUUV는 실험실에서 운용할 수 있는 핵심 부체계 장치(실장비)를 적용한 부체계 HILS를 수행하여, 해상시험 시나리오에 대한 핵심 부체계 장치(HW/SW)의 기능과 성능을 실험실에서 사전에 시험/검증한다. 부체계 HILS 시험이 완료되면 조선소 등의 대형 공장으로 XLUUV 장비를 이동하여 모든 부체계 실장비를 연동한 현장통합 HILS 시험을 수행한다. 현장통합 HILS에서는 모든 해상시험 시나리오에 대해 시험/검증하는 것이 목적이 아니라, 체계 조립 단계에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 확인하기 위한 목적으로 수행한다. 체계 조립 전/중/후 단계에서 현장통합 HILS를 통해 XLUUV의 자율제어 기능(HW/SW)이 모든 부체계 실장비를 연동한 상태에서 제대로 동작하는지를 확인한다.

본 논문에서는 이러한 실험실이 아닌 조선소 등의 대형 공장에서도 XLUUV의 자율제어 기능(HW/SW)을 종합적으로 확인할 수 있는 현장통합(site integration) HILS 기법을 제안한다.

## 2. 초대형급 무인잠수정(XLUUV)의 현장통합 HILS 구성

HILS를 수행하기에 앞서, 원격통제장비(RCS: Remote Control System)를 이용하여 XLUUV의 자체점검(BIT: Built-In Test) 결과를 확인하고 상세점검 기능을 통해 XLUUV의 각 부체계가 정상적으로 동작하는지 확인한다. 그리고 운용모드(operational mode)

로 전환하여 해상 시험에서 수행할 임무 계획을 육상에서 확인할 수 있는 현장통합 HILS를 수행한다.

시험대상체인 초대형급 무인잠수정(XLUUV) 실장비와 원격통제장비(RCS) 실장비를 조선소 등의 대형 공장에서 시험/검증하기 위한 현장통합 HILS의 구성은 Fig. 1과 같다.

### 2.1 원격통제장비(RCS)

원격통제장비는 XLUUV를 원격으로 운용하고 통제하기 위한 장비로서, 원격통제장비 운용자가 작성한 XLUUV 임무계획(Mission Plan)을 XLUUV가 수행할 수 있는 임무프로파일(Mission Profile)로 변환하고 XLUUV에 전송하는 기능을 가진다.

원격통제장비는 XLUUV를 근거리 혹은 원거리에서 운용/통제하기 위한 WiFi(Wireless Fidelity) 통신, RF(Radio Frequency) 통신, LTE(Long Term Evolution) 통신, 위성 통신 등의 무선통신 기능을 갖추고 있다. 원격통제장비는 무선통신 장비를 통해 XLUUV와 연동한 이후, Fig. 2와 같이 점검모드(inspection mode)로 전환하여 XLUUV의 각 부체계에 순차적으로 전원을 인가한다. 전원 인가 후에는 각 부체계 장비의 자체점검(BIT) 결과를 확인하고, 필요에 따라 전원 종료 및 재부팅 명령을 부체계 장비에 전송하여 장치의 복구 능력과 안정성도 검증한다. 이러한 절차를 통해 XLUUV 부체계 장비의 전원 관리, 센서 연동, SW 상태 및 시스템 안정성을 종합적으로 확인할 수 있다. 장비 점검이

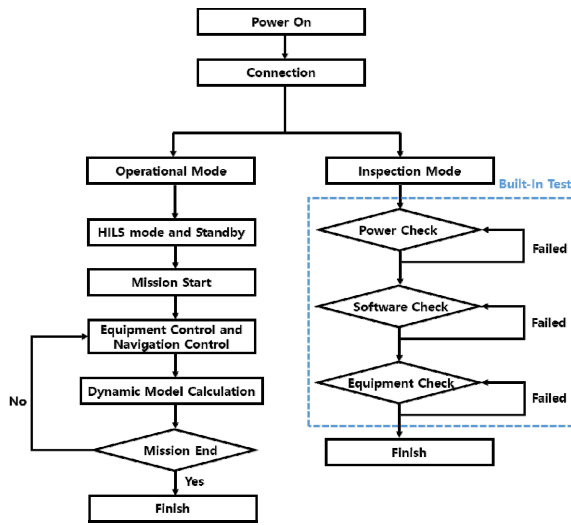


Fig. 2 Sequence diagram of the site integration HILS for the XLUUV

완료된 이후 육상 환경에서 검증이 가능한 장비를 대상으로 제어 명령을 인가하여 장비를 구동하여 각 구성 요소에 대한 상세점검을 수행한다. 이 과정에서 명령 수행 여부 및 장비 응답에 대한 메시지와 결과값을 실시간으로 확인하고 장비의 동작 상태와 성능 특성을 종합적으로 검증하여 잠재적인 오류 요인을 사전에 식별한다. 해당 절차는 장비가 실제 운용 환경에서 안정적으로 작동할 수 있는지를 확인하는 중요한 단계로 이후 수행될 HILS 시험의 신뢰성을 확보할 수 있다.

자체점검 및 상세점검 절차를 통해 XLUUV 부체계의 이상 여부를 확인한 후, 원격통제장비는 운용모드로 전환하여 임무프로파일을 XLUUV에 전송한다. XLUUV는 원격통제장비의 임무 시작 명령에 의해 임무를 시작하며, 임무 수행 중에 무선통신이 가능한 경우에는 원격통제장비에서 XLUUV의 상태를 실시간 모니터링하고 원격으로 임무를 변경할 수도 있으며 비상 상황에 대응할 수 있다.

## 2.2 초대형급 무인잠수정(XLUUV)

XLUUV는 자율제어부, 운항장치부, 수상/수중 통신장비, 능/수동 소나센서, 에너지원, 추진동력부, 선체부 등으로 구성되어 있으며, 원격통제장비와의 외부 통신을 위한 WiFi 통신, RF 통신, LTE 통신, 위성 통신 등의 무선통신 기능을 갖고 있다.

XLUUV는 마스트에 탑재된 무선통신 장비를 통해 원격통제장비가 전송한 임무프로파일과 원격통제 명령에 따라 임무를 수행한다(Kang et al., 2025). 효율적인 데이터 송수신 처리와 확장성을 확보하기 위해서 XLUUV는 대규모 분산 환경에서 최적의 성능을 발휘하는 DDS(Data Distribution Service) 미들웨어를 채택하고 있다. 자율제어부의 연동처리장치(interface data processing device)는 각 부체계의 다양한 센서와 장비로부터 수집되는 CAN, Serial, Ethernet 통신 기반의 하위 계층 데이터를 DDS 프로토콜로 변환하여 송수신함으로써 자율제어부 내부 SW 모듈간의 효율적인 데이터 송수신과 관리 기능을 지원한다. 자율제어부의 자율

제어장치(autonomous control device)는 각 부체계의 다양한 센서와 장비로부터 수신된 정보를 종합하여 임무프로파일에 따른 제어 명령을 생성하고 이를 다시 각 부체계에 전달함으로써 XLUUV의 자율제어 기능을 수행한다(Cho et al., 2025). XLUUV 부체계의 상세 데이터는 XLUUV 내부의 기록장치에 기록되고, 임무종료 후 기록자료분석장비를 통해 기록장치의 기록데이터를 상세 분석하여 임무 수행 결과를 평가한다.

## 2.3 현장통합 HILS 장비

XLUUV의 현장통합 HILS 장비는 HILS 실험실의 FMS(Flight Motion Simulator) 장비와 실시간처리장치(real-time computer) 등을 사용하지 않고 일반 PC를 활용하여 현장통합 HILS를 수행할 수 있도록 설계/개발하였다.

현장통합 HILS 장비의 SW는 기능적인 분리와 실시간 연산 성능을 확보하기 위해 시험통제 SW 모듈(test control module)과 부체계모의 SW 모듈(subsystem emulator module)로 구분하여 개발하였고, HILS 시험 중에 무인잠수정 내부의 모든 DDS 메시지는 부체계 모니터링 장비(subsystem monitoring equipment)를 이용하여 실시간으로 확인할 수 있다.

시험통제 SW 모듈은 시험환경 설정/관리 기능, 시험 운용/통제 기능, 전술화면 전시 기능을 수행하며, 운용자가 실시간으로 시험 상황을 모니터링하고 통제할 수 있는 환경을 제공한다. 부체계모의 SW 모듈은 XLUUV로부터 수신된 상태정보로 XLUUV의 6자유도 운동방정식을 계산하고 그 결과값을 이용하여 생성한 XLUUV 센서 모의정보를 XLUUV로 제공하는 기능을 가진다.

부체계모의 SW 모듈의 무인잠수정 운동방정식은 Newton 제 2 법칙에 따라 기술된다. Newton 법칙은 관성좌표계에서 정의되므로 잠수정 고정좌표계에 대하여 나타난 운동 변수들을 관성좌표계로 정의한 기준 좌표계에 대한 값으로 변환하여야 한다. 기준 좌표계로 운동방정식 좌변의 관성 항을 표현하는 게 유리하지만, 무인잠수정에 작용하는 외력 성분은 나타내기에는 상당히 복잡한 과정이므로, 6자유도(전후 동요: Surge, 좌우 동요: Sway, 상하 동요: Heave, 횡 동요: Roll, 종 동요: Pitch, 선수 동요: Yaw) 운동방정식은 잠수정 고정좌표계에 관하여 기술한다. 아래의 식 (1)은 잠수정 고정좌표계에 대하여 기술된 XLUUV의 6자유도 운동방정식이다(Jeon et al., 2022).

$$\begin{aligned}
 m\left[\dot{u}-vr+wq-x_G(\dot{q}^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})\right] &= X \\
 m\left[\dot{v}-wp+ur-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})\right] &= Y \\
 m\left[\dot{w}-uq+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})\right] &= Z \\
 I_{xx}\dot{p}+(I_z-I_y)qr-I_{xz}(\dot{r}+pq)+I_{yz}(r^2-q^2)+I_{xy}(pr-\dot{q}) \\
 +m\left[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)\right] &= K \\
 I_{yy}\dot{q}+(I_x-I_z)rp-I_{yx}(\dot{p}+qr)+I_{zx}(p^2-r^2)+I_{yz}(qp-\dot{r}) \\
 +m\left[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)\right] &= M \\
 I_{zz}\dot{r}+(I_y-I_x)pq-I_{zy}(\dot{q}+rp)+I_{xy}(q^2-p^2)+I_{zx}(rq-\dot{p}) \\
 +m\left[x_G(\dot{v}-wp+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)\right] &= N
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서 우변의 X, Y, Z, K, M, N은 잠수함에 작용하는 외력을

나타내며 외력은 잠수정의 형상, 환경, 특성에 따라서 달라지므로 적절하게 모델링하여야 한다. 작용하는 외력 성분은 식 (2)와 같이 중력(gravitational force), 부력(buoyant force), 동유체력(hydrodynamic force), 추력(propulsion force), 제어력(control force), 환경 외력(environmental force)으로 구분할 수 있으며 하첨자 G, B, HD, P, C,  $E_{Env}$ 를 사용하여 표현한다. 각 성분별로모델링 된 외력을 활용하여 추진기 회전수와 타각 입력에 대한 운동 응답을 표현하는 운동 모델로 적용한다.

$$\begin{aligned}
 X &= X_G + X_B + X_{HD} + X_P + X_C + X_{Env} \\
 Y &= Y_G + Y_B + Y_{HD} + Y_P + Y_C + Y_{Env} \\
 Z &= Z_G + Z_B + Z_{HD} + Z_P + Z_C + Z_{Env} \\
 K &= K_G + K_B + K_{HD} + K_P + K_C + K_{Env} \\
 M &= M_G + M_B + M_{HD} + M_P + M_C + M_{Env} \\
 N &= N_G + N_B + N_{HD} + N_P + N_C + N_{Env}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

현장통합 HILS를 수행하기 위해서는 무인잠수정의 운항제어에 필요한 센서 정보를 무인잠수정에 실시간으로 모의하여 제공해야 한다. HILS가 시작되면 부체계모의 SW 모듈은 실시간으로 자율 제어부의 플랫폼 제어명령을 수신하고 운동방정식을 계산하여 무인잠수정의 운동정보를 생성한다. 무인잠수정의 운항제어에 필요한 센서는 관성항법장치(inertial navigation system), GPS(Global Positioning System), DVL(Doppler Velocity Log), 심도(depth) 센서 등이 있으며, 무인잠수정이 실제로 움직이지 않는 현장통합

HILS 환경에서는 관성항법장치 내부의 가속도/각속도 센서 정보를 이용할 수 없다. 따라서 부체계모의 SW 모듈에서 무인잠수정의 가속도/각속도 센서 정보를 포함하여 항해센서(GPS, DVL, 심도 등) 정보를 실시간으로 모의하여 전송한다.

### 3. 시험 결과

본 논문에서 제안하는 XLUUV의 현장통합 HILS 시험 체계는 Fig. 3과 같이 이더넷으로 연결된 현장통합 HILS 장비와 XLUUV, 그리고 무선통신으로 연동되는 원격통제장비로 구성된다. 점검 모드에서 XLUUV의 자체점검(BIT) 결과를 확인한 후 운용모드로 전환한다. 주어진 임무에 따라 운동방정식을 계산하고 이를 기반으로 임무를 수행한 뒤 결과를 확인한다.

XLUUV에 전원을 인가하게 되면 에너지원이 동작하여 각 전원 분배장치(power distribution device)로 전원을 공급하게 된다. 원격통제장비를 사용하여 Fig. 4와 같이 육상에서 운용이 어렵고 제어 및 운항 임무 수행에 직접적으로 관련되지 않는 장비를 제외한 구성부의 주장비 및 부체계 장비에 전원을 순차적으로 인가하였다. 수중통신장비, 능/수동 소나센서는 본 시험의 범위에 포함되지 않으므로 전원을 인가하지 않았다. 전원 인가 후 Fig. 5과 같이 전원분배장치와 연동된 주장비 및 부체계 장비의 전압과 전류값을 점검하여 정상적으로 공급되었음을 검증하였다. 처리장치

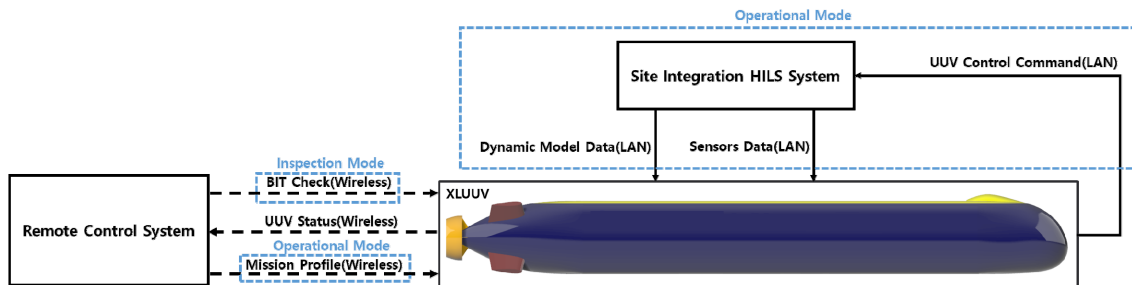


Fig 3. Configuration of the site Integration HILS for the XLUUV



Fig. 4 Power system status display of the XLUUV

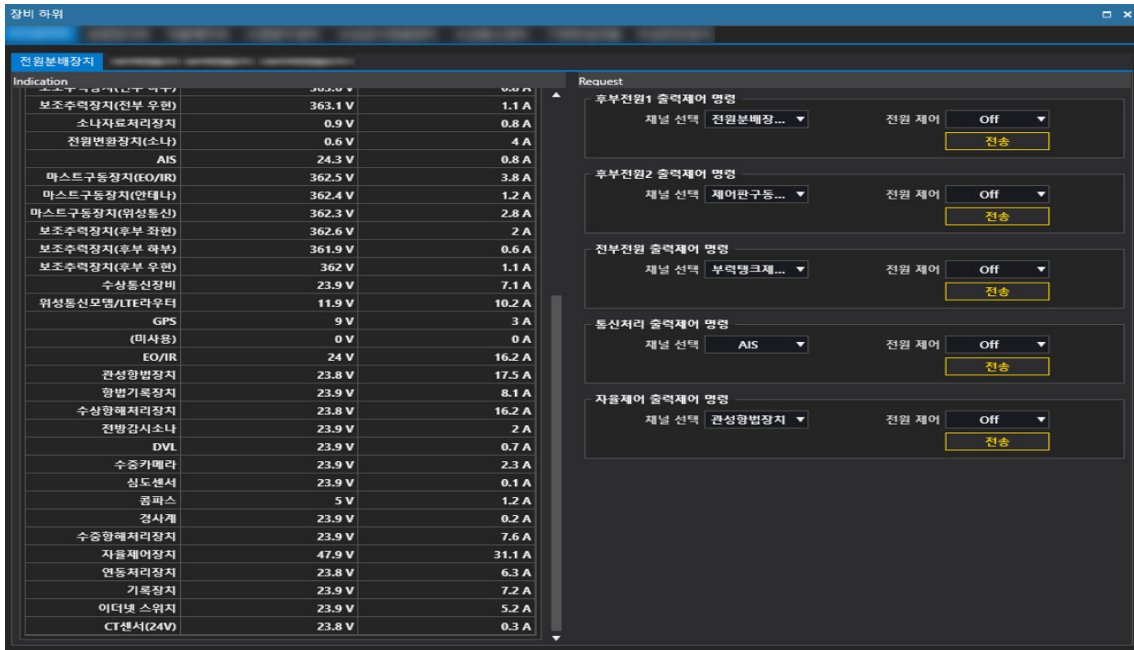


Fig. 5 Voltage and current status display of the XLUUV



Fig. 6 Processing system status display of the XLUUV

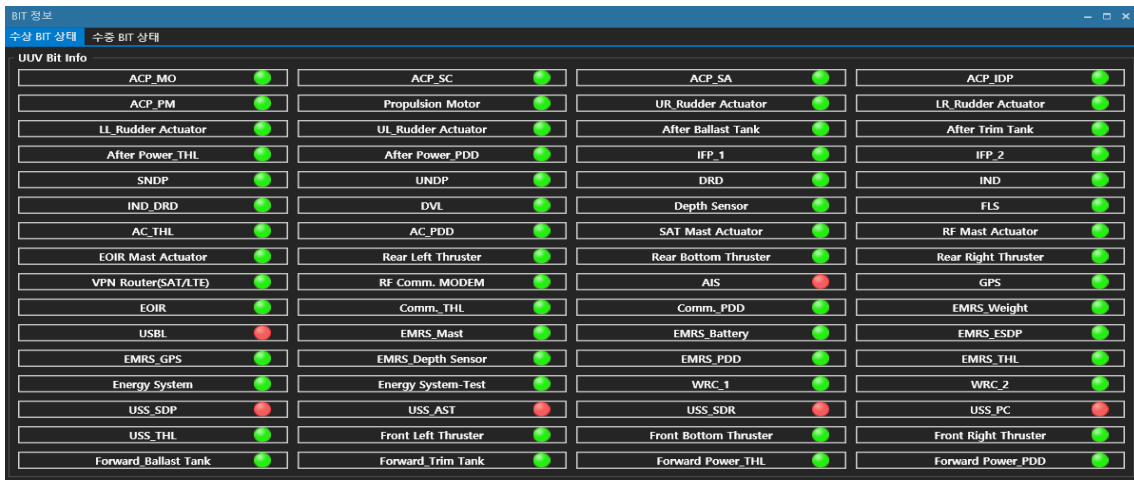


Fig. 7 BIT status display of the XLUUV

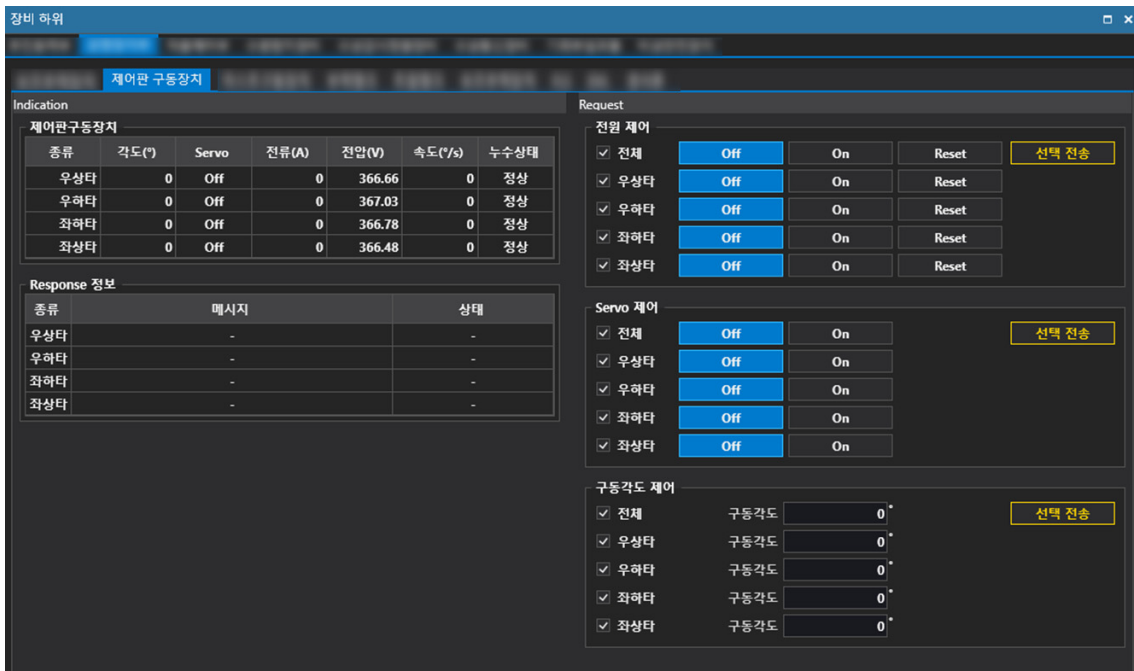


Fig. 8 Subsystem control panel display of the XLUUV

의 SW 모듈의 정상 동작 여부를 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 SW상태 정보를 점검하였다. 각 모듈이 초록색으로 표시되는 경우 정상 동작을 의미하여 운용 가능 상태(operable)임을 확인하였다. 또한 전원 종료(shutdown) 및 재부팅(reboot) 명령을 통해 처리장치들의 복구 능력과 안정성도 확인하였다. 주장비 및 부체계 장비의 점검이 완료되면 Fig. 7과 같이 전체 BIT 상태를 확인하였다. 붉은색으로 표시되는 경우 비정상상태 및 데이터를 수신 받지 못하는 상태이며, 초록색으로 표시되는 경우 정상 상태를 나타낸다. 현장통합 HILS에서 사용되지 않는 장비를 제외한 모든 장비가 정상 상태임을 점검하였다. 장비 점검 과정이 완료된 이후

Fig. 8과 같이 육상에서 운용이 가능한 장비들 대상으로 개회로 시험(open loop test)을 수행하여 제어명령에 대한 부체계 장비의 응답 특성을 확인한다. 제어판구동장치(control surface controller), 마스트구동장치(mast actuators), 부력탱크제어장치(main ballast tank controller), 트림탱크제어장치(trim tank controller), 보조추력장치(thrusters)의 경우 서보(servo) 제어를 제어 수행한 후 제어명령을 인가하여 요구된 제어 특성과 응답 속도를 만족하는지 검증하였다.

원격통제장비를 활용한 장비 점검 과정이 끝나게 되면 현장통합 HILS 장비를 사용하여 HILS 모드를 XLUUV에 전송하고 임무

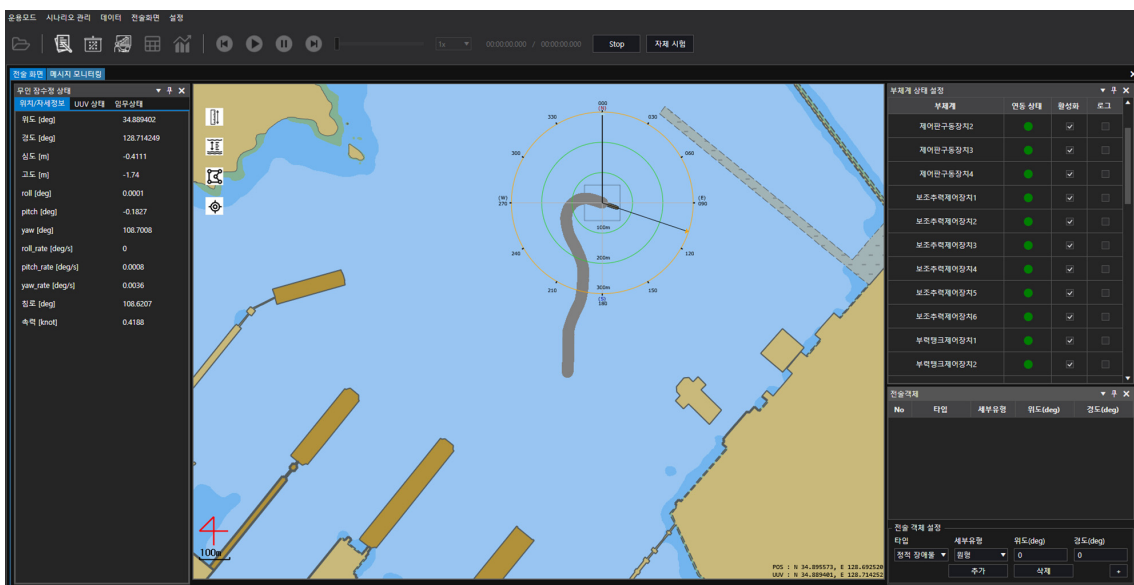


Fig. 9 Trajectory display of the XLUUV on a sea chart

대기상태로 전환한다. XLUUV 자율제어부는 육상에서 운용이 불가능한 장비들에 HILS 모드를 전송하고, HILS 모드를 전달받은 장비들은 제어 명령을 입력받아도 임무를 수행하지 않고 모의 신호를 생성한다. 시험 준비 상태가 되면 원격통제장비가 최종적으로 임무 시작 명령을 전송하여 임무를 수행하도록 한다.

본 시험에서는 Fig. 9와 같이 침로를  $\pm 30^\circ$ 로 변경한 침로제어 시험을 수행하여 XLUUV의 수상 조종 성능을 검증하였다. 임무가 시작되면 XLUUV 자율제어부의 운항제어 명령이 각 부체계에 전송된다. 현장통합 HILS 장비는 XLUUV로부터 수신된 상태정보로 XLUUV의 6자유도 운동방정식을 계산하고 그 결과값을 이용하여 생성한 센서 모의정보를 관성항법장치로 전송한다.

무인잠수정의 관성항법장치는 현장통합 HILS 장비에서 전송한 가속도/각속도 센서 모의정보와 항해센서(GPS, DVL, 심도 등) 모의정보를 이용하여 항법계산을 수행한다. 무인잠수정의 자율제어부는 관성항법장치의 항법정보와 항해센서 정보를 종합하여 새로운 제어명령을 생성하여 무인잠수정의 각 부체계에 전달하고, 무

인잠수정의 자율제어부에서 생성한 새로운 제어명령은 다시 현장통합 HILS 장비로 전달되는 과정이 반복되며 현장통합 HILS의 폐회로 시험(closed loop test)이 수행된다. 이러한 과정을 통해 제어 명령에 대한 요구 제어 특성과 응답 속도를 만족하는지 검증하였으며, 해당 폐회로 시험은 임무 종료 시까지 계속 진행되어 Fig. 9와 같은 침로제어 시험 결과를 얻을 수 있었다.

침로제어시험 수행 이후 자율제어부의 기록장치에 저장된 데이터를 확인하여 XLUUV가 계획된 임무를 정상적으로 수행하였는지 확인하였다. 검증 과정에서는 운동 모델로부터 산출된 위도 및 경도의 시뮬레이션 값을 참값(Ground Truth)으로 가정하고, 이를 관성항법장치의 항법 결과와 비교하였다. Fig. 10은 XLUUV의 침로를  $\pm 30^\circ$ 로 변경하며 침로제어시험을 수행한 궤적을 나타낸다. 비교 결과 GPS, DVL, 심도 센서의 데이터가 HILS 환경에서 정상적으로 모의되어 관성항법장치로 전달되었으며 임무 경로를 따라 안정적으로 운항함을 확인할 수 있었다.

4개의 제어판 구동장치에 대해 자율제어부가 생성한 제어 명

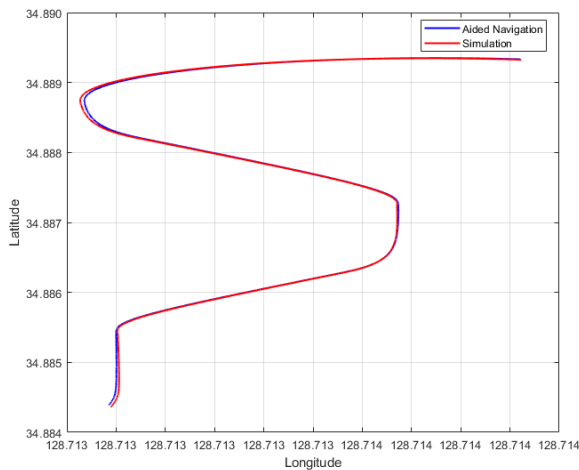


Fig. 10 Latitude and longitude comparison: aided navigation vs. simulation

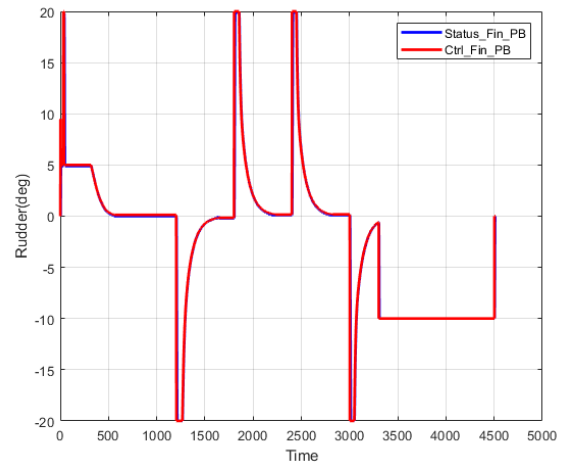


Fig. 12 Control surface actuators: command and response for port bottom

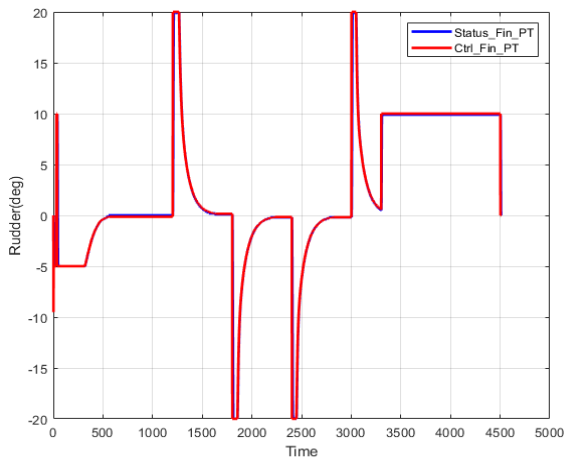


Fig. 11 Control surface actuators: command and response for port top

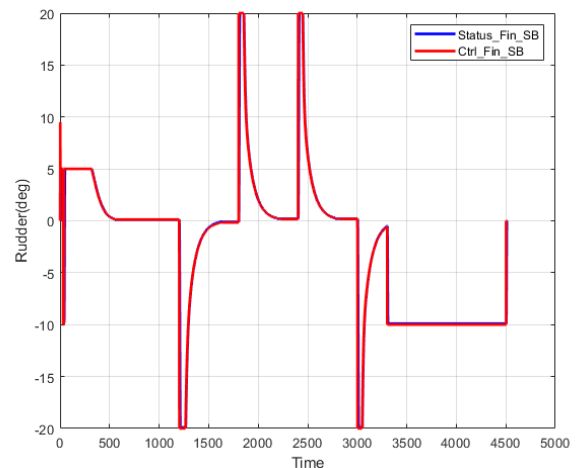


Fig. 13 Control surface actuators: command and response for starboard bottom

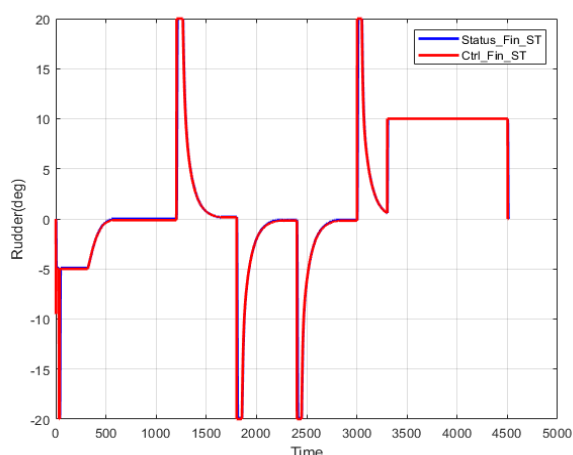


Fig. 14 Control surface actuators: command and response for starboard top

령 값과 실제 응답 값을 시간에 따라 비교하였다. Fig. 11 ~Fig. 14 는 방향타각 제한각을  $\pm 20^\circ$ 로 설정하고 명령침로 오차를 0으로 만들기 위한 타각 명령값과 실제 제어판구동장치의 응답을 나타낸다. 4개의 제어판(좌상타, 좌하타, 우하타, 우상타) 구동장치 모두 임무 수행 과정에서 명령 값과 응답 값이 거의 일치함을 확인할 수 있었으며 이를 통해 자율제어부와 제어판 구동장치 간의 데이터 연동 및 제어 신뢰성이 적절하게 검증되었음을 보여준다. 또한 이러한 검증을 통해 XLUUV가 계획된 경로 및 임무에 따라 안정적으로 제어 가능함을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

초대형급 무인잠수정(XLUUV)은 크기와 중량으로 인해 실험실에서 전체 체계 수준의 시험/검증을 하기 어려우며 처리장치와 같은 핵심 구성 요소에 대해서만 HILS 시험을 통해 검증이 이루어진다. 또한 실험실 HILS 시스템은 다양한 하드웨어 구성이 필요하지만 물리적 점유 공간이 크고 복잡한 배선작업이 수반되어 타 공정과의 간섭이 빈번한 조선소 등의 대형 공장 내부에는 구축하기 어렵다는 한계가 존재한다. 이러한 제약점으로 XLUUV는 제한적인 시험/검증을 통해 조립이 이루어지며 실제 해상 시험에서의 위험 요소를 상승시키는 요인이 된다.

본 논문에서는 기존의 실험실 환경에 국한되었던 무인 자율 수중운동체의 HILS 검증체계를 조선소 등의 대형공장에서도 XLUUV의 자율제어 기능(HW/SW)을 종합적으로 확인할 수 있는 현장통합 HILS 장비의 설계 및 개발에 관하여 기술하였다. 현장 통합 HILS 시험을 통해 해상 시험에서 수행할 임무 계획을 XLUUV의 현장에서 실행하여 XLUUV의 HW와 SW가 정상적으로 동작하는지 검증함으로써 해상 시험에서의 위험 요소를 사전에 발견하고 각 부체계의 로직(logic)과 파라미터(parameter) 등을 최적화할 수 있게 되었다.

## 후 기

이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(915057401).

## References

- Cho, Y.H., Jang, C.J., Lee, S.Y. and Kim, H.R., 2025. Development of autonomous navigation for extra-large reconfigurable unmanned underwater vehicle. *Korea Institute of Military Science and Technology Annual Conference Proceedings*, Jeju, Republic of Korea, 1946–1947 June 2025.
- Hwang, A., Yoon, S.I. and Song, J.H., 2012. Hardware in loop simulation on autopilot controller with MEMS AHRS for high speed unmanned underwater vehicle. *Journal of ocean engineering and technology*, 26(5), pp.81–86.
- Hyun, C., 2013. Decoupled controller design of small autonomous underwater vehicle and performance test using HILS. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 16(2), pp.130–137.
- Jeon, M.J., Yoon, H.K., Park, J.Y. and You, Y.J., 2022. Analysis of maneuverability of X-rudder submarine considering environmental disturbance and jamming situations. *Applied Ocean Research*, 121, Article 103079.
- Jung, S.Y. and Oh, J.S., 2012. Improvement of submarine cooling system using HILS simulation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(5), pp.376–383.
- Kang, J.G., Kwon, L.U., Yu, C.W., Yim, Y.B. and Kim, D.H., 2025. Introduction to mission control system of extra-large unmanned underwater vehicles. *Korea Institute of Military Science and Technology Annual Conference Proceedings*, Jeju, Republic of Korea, 988–989 June 2025.
- Montelo, H. and Furukawa, CM., 2010. Hardware in the loop simulation applied to semi-autonomous underwater vehicles. 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2010, Sao Paulo, Brazil, 1–6 November 2010.
- Nam, K.W., 2002. A study on implementation of an underwater vehicle HILS/MILS system in synthetic environment. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 5(2), pp.72–82.
- Park, Y.I., Choi, Y.C., Cho, K.K. and Lee, M.H., 1999. Implementation of real time HILS system for ground test of underwater vehicle. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 25(2), pp.282–289.
- Saho, Z. and Feng, S., 2019. Research on discontinuous

guidance and hardware-in-the-loop simulation for unmanned underwater vehicle. *Cluster Computing*, 22(4), pp.7975–7982.

### Authorship Contribution Statement

Jin Sun Kim: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing



김진순