

하이브리드 수중 글라이더의 제어 시스템 설계 및 성능 시험

A Design Control System of Hybrid Underwater Glider and Performance Test

지대형¹ · 최형식^{1*} · 김준영² · 정동욱¹ · 정성훈³

¹한국해양대학교 기계공학과

²한국해양대학교 기계공학부

³한국해양대학교 산업기술연구소

Dae-hyeong Ji¹ · Hyeung-sik Choi^{1*} · Joon-young Kim² · Dong-wook Jung¹ · Seong-hoon Jeong³

¹Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

²Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

³Research Institute of Industrial Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

[요 약]

본 논문에서는 고정밀 항로 탐색 기능과 장기 임무 수행 능력이 장점인 하이브리드 수중 글라이더의 제어에 관한 연구를 수행하였다. 하이브리드 수중 글라이더의 동적 모델링은 자세 제어기와 부력 엔진, 추진기의 수치 모델을 기반으로 하였다. 하이브리드 수중 글라이더의 부드러운 제어와 정밀한 항해를 고려하여 제어 시스템을 설계하였다. 물을 흡입 할 수 있는 부력 엔진은 선체의 부력을 제어하도록 설계되었다. 그리고 배터리를 탑재한 질량 이동체는 선체의 피칭 동작을 제어 할 수 있도록 설계되었다. 또한 부력 엔진 및 자세 제어기를 제어하기 위한 제어 시스템이 구성하였다. 성능을 확인하기 위해 제작된 모델을 사용하여 수조 시험을 수행하였다.

[Abstract]

In this paper, we studied the control of the hybrid underwater glider (HUG), which has the advantage of high precision route search function and long-term mission capability. Dynamic modeling of HUG is based on numerical model of the attitude controller and buoyancy engine, thruster. We designed the control part considering the smooth control and precise sailing of HUG. A buoyancy engine capable of inhaling water is designed to control the buoyancy of HUG. And mass shifter carrying the battery was designed for controlling pitching motion of HUG. A control system for controlling the buoyancy engine and the attitude controller was constructed. In order to verify performance, we performed water tank test using manufactured HUG.

Key word : Hybrid underwater glider, Dynamic modeling, Attitude controller, Buoyancy engine, Thruster.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.1.21>



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.

Received 6 February 2017; Revised 8 February 2017

Accepted (Publication) 24 February 2017 (28 February 2017)

*Corresponding Author; Hyeung-sik Choi

Tel: +82-51-410-4297

E-mail: hschoi@kmou.ac.kr

1. 서론

대표적인 무인 해양탐사 로봇으로 자율 무인 잠수정 (AUV; autonomous underwater vehicle)이 잘 알려져 있다. AUV는 운용자의 개입이 최소화되어 스스로 자율운항이 가능하여 군사적, 학술적 연구에 사용되는 제어시스템이다. AUV는 해양환경의 다양한 정보를 수집하거나 감시, 정찰활동 등의 중요한 임무를 수행하며 특히 사람이 접근하기 어려운 심해 탐사에 활용이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 추진동력을 생성하기 위한 에너지의 저장량이 배터리의 용량에 의해 한정되어 있으므로 장시간 탐사에 불리하다는 단점이 있다. 한편 수중 글라이더 (UG; underwater glider)는 바다의 심층과 표층을 오가면서 원하는 지점으로 이동할 수 있도록 고안된 무인 해양탐사 로봇으로서 역할은 AUV와 크게 다르지 않지만 프로펠러 추진방식을 사용하는 AUV와는 달리 별도의 외부 추진체를 사용하지 않기 때문에 에너지 측면에 있어서 AUV보다 효율적이다[1]. UG의 추진력은 유체의 유입과 배출에 의한 부력 조절과 내부의 질량 이동과 날개의 움직임에 의한 모멘트 변화에 의해 발생된다. 따라서 동력 에너지의 사용이 비교적 적기 때문에 장시간, 장거리의 해양 탐사에 적합하다[1],[2].

해외에서는 Slocum glider, Spray glider, Sea glider, X-Ray와 같은 다양한 형태의 UG를 개발하였다[3]-[5]. 이러한 UG에 여러 가지 음향장비 및 센서를 장착하여 넓은 범위의 해저 지형 또는 해양 환경 자료를 수집하거나, 대서양 횡단 실험을 수행하는 등 해양생태학 및 해양환경학에 운용할 수 있는 실험체들을 수행하고 있다[6]-[8]. 반면 국내에서는 극소수의 연구 결과를 제외하고 UG에 대해 진행된 연구는 거의 전무하다고 할 수 있다[9]. 하지만 2014년 Kiost는 “무인 수중글라이더의 운동 제어기술과 자율운항제어기술”에 관한 연구를 진행하였으며, 이를 검증할 시제를 제작하여 수조 시험 및 해상 시험을 성공적으로 진행하였다[10].

최근에는 미국과 중국에서 하이브리드 수중 글라이더

(HUG; hybrid underwater glider)라는 더욱 진보된 무인 해양탐사 로봇을 개발하였다. 이것은 기존 UG에 비해 해류의 흐름이나 수면의 바람과 같은 외력의 영향을 적게 받으며, 목표해역 도달 성능 향상을 위해 기존의 부력제어 추진방식과 외부 추진기를 이용한 추진방식을 결합하였다. 그리하여 UG의 에너지 절감의 장점과 자체 추진을 통한 제어성능의 병합으로 활용방안이 확대되었으며, 정밀 경로 탐색이 가능하며 목표물 접근, 조류 대응, 수중 회수 등이 기존 UG에 비해 쉬워졌다.

본 논문에서는 일반적인 UG에 외부 추진기를 추가하여 선택적으로 자항이 가능한 HUG를 설계하고, 글라이딩 운동 및 추진기를 사용한 자항운동의 원활한 동작 및 경로 제어를 위한 제어시스템을 설계 제작하였으며, 이를 적용하여 개발한 제어시스템의 제어성능을 실험으로 검증하고자 한다. 이를 위해 2장에서는 HUG의 주항 개념을 설정하고, 3장에서는 HUG의 구조를 설계하였으며, 4장에서는 HUG를 구동하기 위한 하드웨어 제어시스템을 설계하였다. 또한 5장에서는 정밀 제어를 위한 제어 알고리즘을 구현하여 이를 바탕으로 수조에서 HUG의 자세 제어 실험들을 실시하여 6장에서 결론을 내린다.

II. 하이브리드 수중 글라이더의 주항 개념

일반적으로 UG의 주항은 수직 운동과 수평 운동으로 나누어 설명할 수 있는데, 수직운동은 추진력을 발생시키기 위한 운동이다. 그림 1은 UG의 수직 주항을 나타낸 것이다. UG는 수심상환과 하한 사이를 상승과 하강을 반복하여 추진력을 얻는다. 하강 시에는 부피를 감소하여 부력을 감소시켜 추진하며, 수직 자세를 제어하여 받음각 (attack angle)을 최적화되도록 주항한다. 즉 종동요각(pitch)을 제어하는 것이다. UG의 수심이 하한에 도달하면 다시 UG는 부피를 증가시켜 부력을 증가시킨 힘을 이용하여 추진하며, 이와 동시에 수직 자세를 제어하여 받음각을 최적화되도록 주항한다.

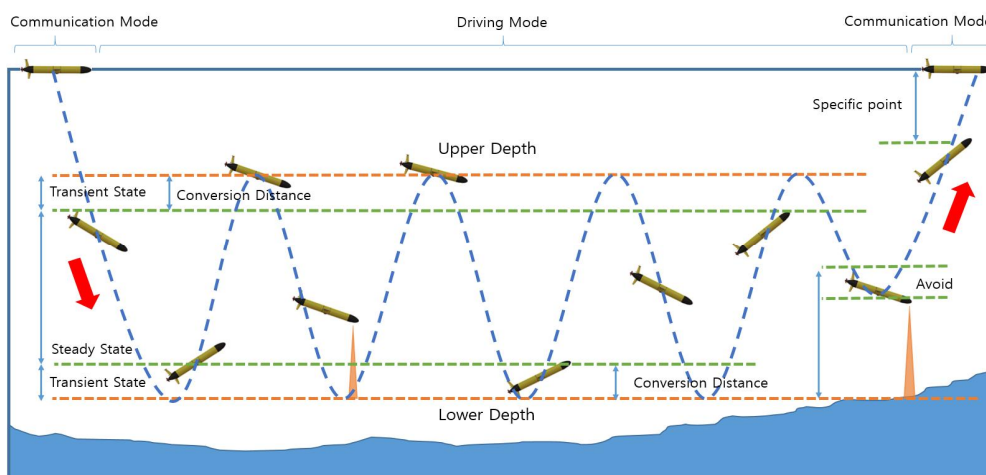


그림 1. 수중 글라이더의 수직 주항
Fig. 1. Vertical driving of UG.

이러한 하강과 상승을 반복하여 전진하며, 정점을 향해 주향하도록 러더(rudder)를 회전하고 배터리팩의 위치를 조절하여 무게 중심을 이동시켜 목표된 정점을 향해 추진하도록 선수방향을 조절한다. 목표점에 도달하거나 통신주기에 도달하였을 때 통신모드로 전환하여 수표면에 부상한다. 이를 반복하여 주어진 미션을 수행한다. 주향 중 UG는 수중 측심기로 해저면과의 거리를 측정하며 선체가 하강 시에 미리 설정된 하한 거리 값보다 해저면까지의 거리가 짧을 경우 해저면 충돌 방지를 위해 깊이 방향으로 이동하지 않고 상승하도록 제어한다.

그림 2는 UG의 수평 주향을 나타낸 것이다. 수평 주향은 연속된 정점을 순차적으로 추종하는 방식을 사용하며 현재 목표된 정점을 향해 선수동요각(Yaw)을 제어하여 추종한다. 목표지점이나 경유점에 부상하도록 설정하고 부상 후에 현 정보를 바탕으로 목표지점이나 경유점의 일정 반경 내에 도달하지 못하면 Yaw를 제어한 후에 잠수하여 다음의 원하는 목표반경 내에 도달하도록 제어한다.

이러한 수직/수평 주향은 일반적인 UG의 주향이며, 그림 3은 HUG의 주향을 나타낸 것이다. HUG는 수직/수평 주향을 수행하는 도중에 선택적으로 외부 추진기를 이용하여 주향하는 것이 가능하다. 이러한 특징을 이용하여 수직 주향 시 선체 상하의 장애물을 피해 일정 수심에서 주향하는 것이 가능하며, 수평 주향 시 강한 조류를 극복하거나 목표 해역에서 벗어났을 시 일반 주향보다 빠르게 주향 경로를 변경하여 기존의 경로로 돌아

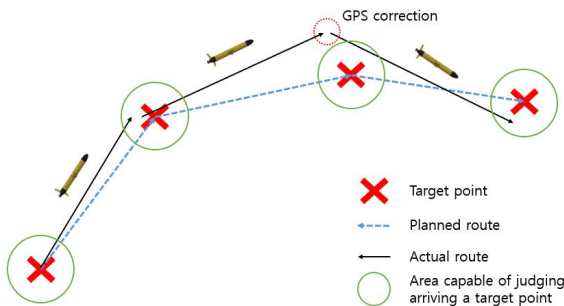


그림 2. 수중 글라이더의 수평 주향
Fig. 2. Horizontal driving of UG.

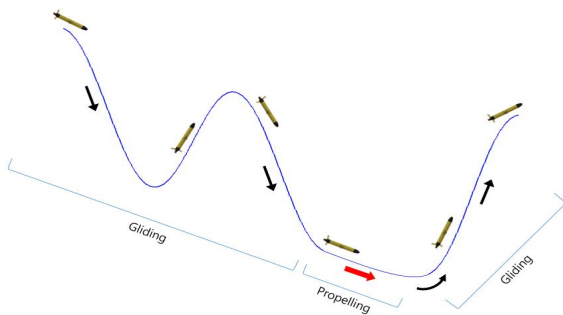


그림 3. 하이브리드 수중 글라이더의 주향
Fig. 3. Hybrid gliding of HUG.

올 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 본 연구에서는 HUG의 추가 탑재 공간(payload)에 도플러 속도계 (DVL; doppler velocity log)를 장착하여 선체의 속도 성분을 보정해주어 기존의 UG에 비해 더욱 정밀한 경로 제어가 가능하다.

III. 하이브리드 수중 글라이더의 구조

그림 4는 설계된 HUG의 외형도이다. HUG는 수심 200 m급을 목표로 선체는 외경 220 mm의 토퍼도(Topedo) 선형을 가지며, 총 길이는 1970 mm로 설계되었다. 양쪽 주날개의 외곽 끝점 간의 길이는 1040 mm, 러더 끝점에서 안테나 끝점 간의 길이는 580 mm, HUG의 총 중량은 약 50.50 kgf, 부력량은 약 50.60 kgf로 설계되어져, 약 0.1 kgf의 양성부력을 가지고 있다. 또한 선미 중앙에는 추진기가 장착되었으며, 하단에 러더를 장착하였다. 표 1은 설계된 HUG의 수치 정보를 정리한 표이다.

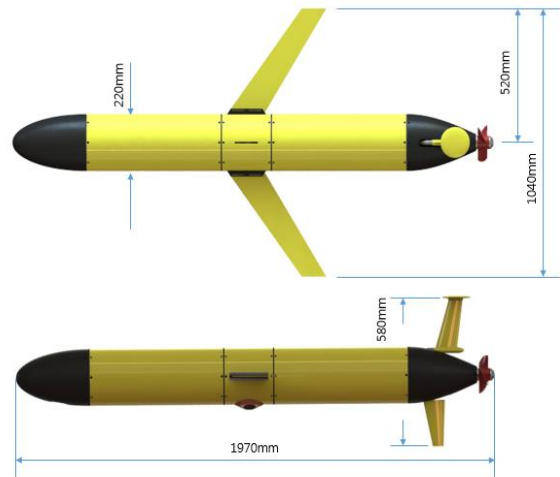


그림 4. 하이브리드 수중 글라이더의 외형도
Fig. 4. Appearance of HUG.

표 1. 하이브리드 수중 글라이더의 수치 정보
Table. 1. Dimensions of HUG.

Index	Value	Units
Length	1.97	m
Diameter	0.22	m
Width	1.04	m
Height	0.58	m
Weight	50.50	kgf

3-1 기구부 구조

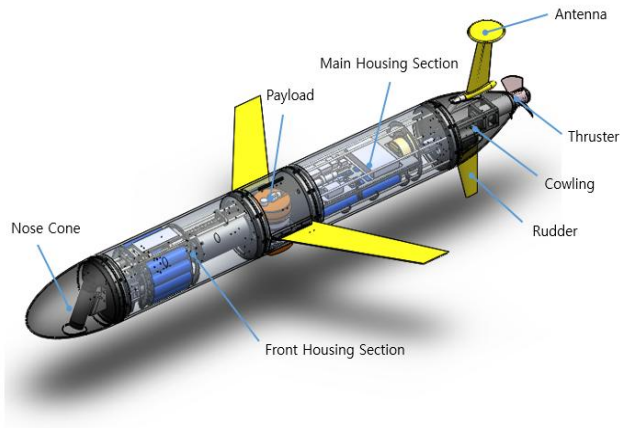


그림 5. 하이브리드 수중 글라이더의 내부 구조
 Fig. 5. Cross section of HUG.

그림 5는 HUG의 내부 구조를 나타내는 단면도로 선수부, 동체부 및 선미부로 구성되어 있으며, 동체부 선수 방향에 부력엔진과 자세제어기, 동체부 선미 방향에는 자율제어보드 및 기타 내장품을 탑재하였으며, 동체부 가운데에는 유상하중(Payload)을 탑재하며 외관에 주날개를 장착한다. 유체의 저항을 줄이기 위하여 앞단에 타원형태의 노즈콘(nose cone)과 후면에 카울링(cowling)을 장착한다. 노즈콘과 카울링 안쪽(wet area)에는 해수가 유입되는 구조를 가진다. 카울링의 상단에는 통신을 위한 안테나, 하단에는 선수동요각을 제어하기 위한 러더, 후면에는 자체적인 추진을 위한 추진기로 구성된다.

3-2 부력엔진

UG가 수중에서 수직 주향 즉, 상/하향 활강할 수 있는 에너지는 중력과 부력의 차이로 발생시킨다. 일정한 체적을 유지한 부력상태에서는 임의의 질량체를 추가하여 중력의 영향을 크게 만들어서 가라앉을 수 있고, 해당 질량을 제거하였을 때는 상대적 부력의 증가로 다시 수면으로 떠오르게 된다. 반복적인 활강을 필요로 하는 UG의 경우에는 일정한 중력이 작용하는 상태에서 부력을 조절할 수 있는 구동기가 필요하다.

본 HUG에서는 그림 6과 같이 피스톤으로 내부 체적을 확보하는 실린더방식을 채택하였고, 피스톤 작동에는 리니어 모션 시스템을 적용하여 정밀한 부력제어가 가능하도록 하였다. 선체가 하향 활강 시에는 중력보다 상대적으로 부력을 감소시키며, 반대로 상향 활강 시에는 중력보다 부력을 증가시킨다.

3-3 자세제어기

UG는 내부의 질량을 이동시켜서 자세를 제어할 수 있다. 부력제어만으로 선체의 Pitch를 변화시켜 활강할 수 있지만, 최적의 활강 경로 조정과 수중에서의 자세 안정화를 위해서는 추가적인 자유도를 제어할 구동기가 필요하게 된다. 본 HUG는 그

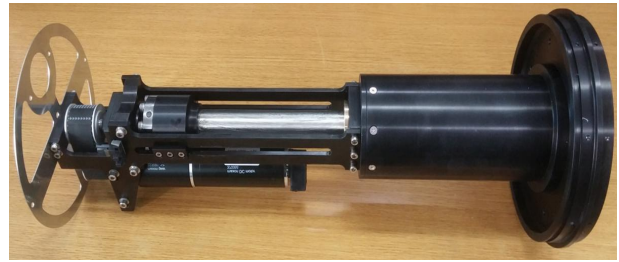


그림 6. 부력엔진
 Fig. 6. Buoyancy engine.

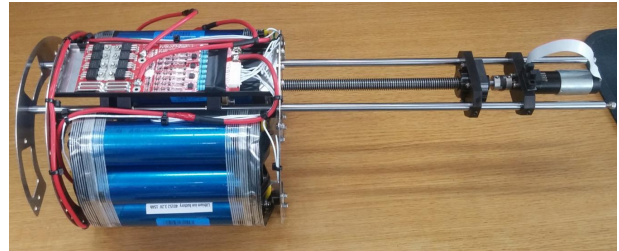


그림 7. 자세제어기
 Fig. 7. Attitude controller.

림 7과 같이 리니어 모션 시스템을 통하여 선체 내부의 무게 질량을 이동시켜 Pitch를 제어하여 주향 시에 수심제어를 가능하도록 한다.

자세제어기의 메커니즘은 무게 이동에 의한 Pitch를 제어하는 것으로 선체 내부의 질량을 이동할 때 부력 중심은 고정되어 있지만 중력 중심이 이동방향에 따라 변하게 되어 선체 전체의 평형 상태가 변화하게 된다. 무게 추가 선수 쪽으로 이동하면 선체는 앞으로 기울고, 선미 쪽으로 이동하면 선체가 뒤로 기울게 된다.

IV. 제어시스템 설계

본 논문에서는 HUG의 글라이딩과 추진기를 사용하여 경로 및 속도를 제어하고 원하는 동작을 수행할 수 있도록 제어시스템을 구성하였다. 구성한 HUG의 제어시스템의 하드웨어 구성도는 그림 8과 같다. 제어시스템은 크게 자율제어보드, 자세제어보드, 전원보드의 총 3개로 구성하였다. 자율제어보드는 각종 센서들의 인터페이스와 자율운항제어를 위한 기능을 담당하고, 자세제어보드는 각 구동부의 위치 및 On/Off 제어를 수행하며, 전원보드는 배터리와 DC-DC 변환기 등을 이용하여 제어보드에 적절한 전압의 전력을 공급하도록 구성하였다. 위와 같이 파트를 나눈 것은 각 파트가 정해진 임무만을 수행하여 만일에 발생할 수 있는 오류 사항을 줄이며, 추후 문제 발생 시 디버깅 및 수리가 용이하도록 나눈 것이다.

4-1 부력엔진 제어시스템

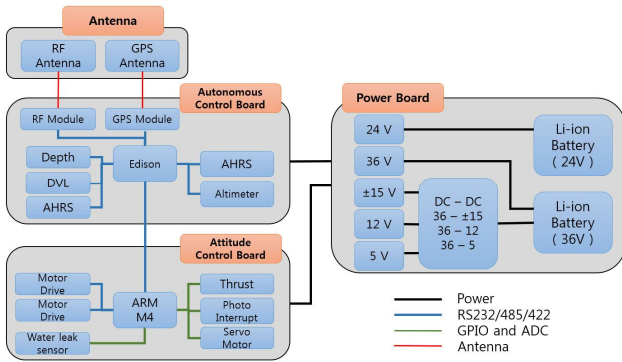


그림 8. 하이브리드 수중 글라이더의 하드웨어 구성도
Fig. 8. Block diagram of HUG.

부력엔진 제어시스템이 제어하는 것은 내부 피스톤의 위치를 이동시켜 부력량을 조절하는 것이다. 피스톤의 위치를 이동시키는 액추에이터로는 200 Watt DC 모터가 이용되었으며, 이를 제어하기 위해 200 Watt급 모터드라이브를 사용하였다.

부력엔진 제어시스템에 사용된 모터에 결합된 엔코더가 절대값 엔코더가 아니므로 초기 동작 시에 중심점을 맞춰주기 위하여 초기 시퀀스를 수행한다. 이후 자율제어보드의 명령에 따라 부력엔진의 피스톤을 이동시키는데 제어량 (controlled variable)은 PID제어 (proportional integral derivative control) 기법을 통해 제어해 준다. 피스톤의 이동 가능한 거리는 중심점으로부터 ± 6.8 cm까지 가능하며, 약 1 mm 정도의 분해능을 가지며 제어된다. 이때 부력 제어량은 ± 432 g이다.

4-2 자세제어기 제어시스템

자세제어기 제어시스템이 제어하는 것은 무게 질량의 위치를 이동시켜 선체의 무게 중심을 조절하는 것이다. 무게 질량의 위치를 이동시키는 액추에이터로는 11 Watt DC 모터가 이용되었으며, 이를 제어하기 위해 50 Watt급 모터드라이브를 사용하였다.

자세제어기 제어시스템에 사용된 모터에 결합된 엔코더는 부력엔진과 같이 절대값 엔코더가 아니므로 초기 동작 시에 중심점을 맞춰주기 위하여 초기 시퀀스를 수행한다. 이후 자율제어보드의 명령에 따라 자세제어기의 배터리팩을 이동시키는데 제어량은 PID제어 기법을 통해 제어해 준다. 배터리팩이 이동 가능한 거리는 중심점으로부터 ± 9.5 cm까지 가능하며 약 1 mm 정도의 분해능을 가지며 제어된다. 이때 질량 제어량은 ± 4.7 kg이다.

4-3 센서 시스템

HUG의 센서 구성은 그림 9에 나타내었다. 사용된 센서는 카울링에 측심기를 장착하여 선체가 하강 주항 시에 해저 바닥면에 충돌하는 것을 방지한다. 앞단 하우징에는 누수를 감지하기

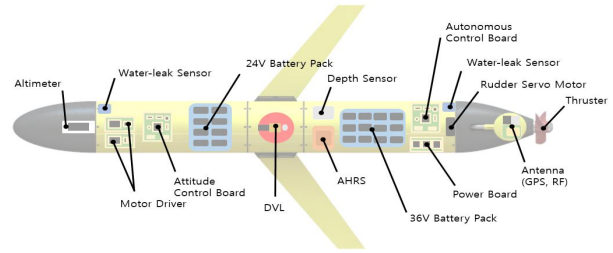


그림 9. 하이브리드 수중 글라이더의 센서 구성
Fig. 9. Sensor arrangement of HUG.

위한 누수 센서가 하우징과 노즈콘이 결합되는 부위에 장착되어 있다. 추가 탑재 공간에는 항법 알고리즘에 사용될 선체의 속도를 측정하기 위한 DVL를 transducer의 방향이 바닥면을 향하게 장착하였다. 뒷단 하우징에는 장비를 탑재할 수 있는 공간이 넓어 많은 센서와 장비를 탑재하고 있다. 순서대로 수중에서 선체의 깊이를 측정하기 위한 수심 측정기, 선체의 자세 및 방향을 계속하기 위한 AHRS, 하우징과 카울링이 결합되는 부위에 누수 센서, 각 센서 및 장비에 전원을 공급하고 배터리를 관리하는 전원보드가 장착되어 있다. 카울링의 상단 날개에는 HUG의 위치 정보 계속을 위한 GPS antenna와 명령 전달 및 정보 수집을 위한 RF antenna가 장착되어 있으며, 카울링의 후면에는 자체 추진을 위한 추진기가 장착되어 있다. 적용센서들보다 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

1) DVL

DVL은 수중에서 잠수정의 속도를 계속하는 대표적인 센서 중 하나이다. 3 축의 속도 값을 도플러 효과에 의해서 최대 20 Hz의 속도로 계속하며, 계속된 값을 프로그램을 이용하여 적분하고 X, Y 변위를 구하게 된다.

2) AHRS

AHRS에 포함된 자이로 센서의 적분 값과 가속도계의 각도를 이용하여 선체의 자세 (roll, pitch)를 추정하며, 여기에 지자기 센서를 이용한 자북 방향 값을 이용한 방향 (heading)을 추정한다. 출력된 추정 자세 및 방향을 이용하여 선체의 heading 제어와 선체 고정 좌표계의 궤적을 지구 고정 좌표계로 변환하는데 이용하게 된다.

3) 수심 측정기

수중에서 깊이를 가장 쉽게 계속할 수 있는 방법은 수심 측정기 (depth sensor)를 이용하는 것이다. 수중 로봇에서는 수심 측정기를 통해 압력 값을 계속하고 계속된 값을 이용하여 수심 방향의 제어를 하게 된다. 수심 측정기의 계속 성능이 최대 100 bar의 값을 계속할 수 있으며, 이는 설계 시 작업 수심으로 설정한 200 m를 초과하여 계속이 가능한 수치이다.

4) 측심기

수중에서 선체와 해저 사이의 거리를 측정하기 위한 방법은 측심기(altimeter)를 이용하는 것이다. 앞서 소개한 수심 측정기는 해수면에서 선체까지의 거리를 측정하기 때문에 해저면과 선체 간의 거리를 측정할 수 있는 방법이 없어 글라이딩 주항 중에 해저면과 충돌을 할 수 있다. 때문에 측심기로부터 해저면까지의 거리 값을 측정하여 수중 글라이더의 해저면 충돌 회피 알고리즘에 사용된다. 본 HUG에 장착한 측심기의 측정 성능은 최대 감지거리 100 m이며, 빔폭은 20°이다.

5) 위성 항법 장치

수중 로봇에 위성 항법 장치 (GPS; global positioning system)를 적용했을 때 장점은 더욱 부각된다. GPS의 장점은 흔히 수중 로봇에서 자세 및 위치 정보를 측정하기 위한 센서인 DVL과 AHRS, IMU에서 발생하는 적분 오차가 없다는 것이다. 그로 인해 본래 센서의 오차 범위 값으로 오차가 고정되어 먼 거리를 주항하는 수중 로봇에서 잠수 후 센서 값의 초기화 및 오차 값을 확인하는데 필수 센서이다.

V. 제어 알고리즘 연구

5-1 동역학 모델링

수중 로봇의 수학적 모델을 정의하기 위해 선체를 강체라 가정하고, 그림 10과 같이 선체 고정 좌표계 (body fixed coordinates)와 지구 고정 좌표계 (earth fixed coordinates)를 사용하였으며 선체 고정좌표계의 원점을 상하좌우의 중심부로 정하여 선수 방향을 x, 우현방향을 y, 수직 아래 방향을 z으로 하는 오른손 좌표계를 사용하였다. 선체 고정 좌표계에서의 운동은 지구 고정 좌표계에 관하여 표현한다.

지구 자체의 공전과 자전에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고 수중 로봇의 속도에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 지구 고정 좌표계는 관성 고정 좌표계 (inertial fixed coordinates)이라고도 한다. 따라서 수중 로봇의 위치와 자세는 관성 고정 좌표

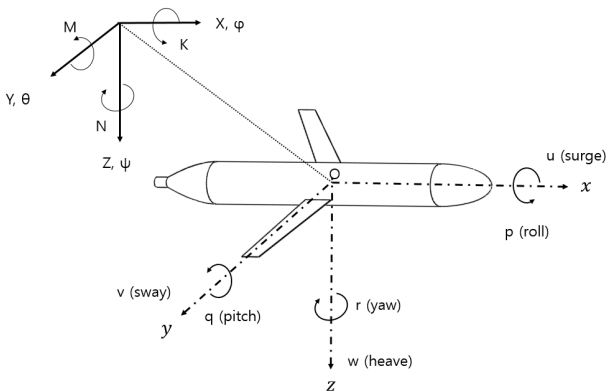


그림 10. 선체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계
Fig. 10. Earth fixed and body fixed coordinate system.

표 2. 하이브리드 수중 글라이더의 6자유도 운동
Table 2. 6 DOF motion of HUG.

Classification	Axis	Motion	Force & Moment	Velocity	Displacement
Translational motion	x	Surge	X	<i>u</i>	<i>x</i>
	y	Sway	Y	<i>v</i>	<i>y</i>
	z	Heave	Z	<i>w</i>	<i>z</i>
Rotational motion	x	Roll	K	<i>p</i>	Φ
	y	Pitch	M	<i>q</i>	θ
	z	Yaw	N	<i>r</i>	ψ

계를 통해 표현하며, 수중 로봇의 선형 속도와 각 속도는 선체 고정좌표계에 의해 표현된다.

HUG의 x, y, z축에 대한 병진 운동과 회전 운동을 6자유도 운동으로 표현하였으며, 사용된 좌표축과 명칭은 표 2와 같다.

정의된 좌표에 따라 HUG의 병진운동 및 회전운동을 뉴턴 제 2법칙에 의해 수식 (1)-(6)과 같이 표현된다[11]. 일반적으로 우변에 포함된 유체력 계수들은 컴퓨터 유체 역학(CFD; computational fluid dynamics) 해석 및 PMM (planar motion mechanism) 실험과 같은 구속모형실험 또는 경험식을 통하여 결정된다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_g(\dot{q}^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = \Sigma X \quad (1)$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] = \Sigma Y \quad (2)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] = \Sigma Z \quad (3)$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] = \Sigma K \quad (4)$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = \Sigma M \quad (5)$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = \Sigma N \quad (6)$$

이때 외력 항에 작용하는 힘을 구분하면 다음의 수식 (7)-(8)과 같이 유체정역학적 힘과 양력, 항력, 제어 유체력과 이에 따른 각각의 모멘트들이 있다.

$$\Sigma F_0 = F_{hydrostatic} + F_{lift} + F_{drag} + F_{control} \quad (7)$$

$$\Sigma M_0 = M_{hydrostatic} + M_{lift} + M_{drag} + M_{control} \quad (8)$$

5-2 제어 알고리즘

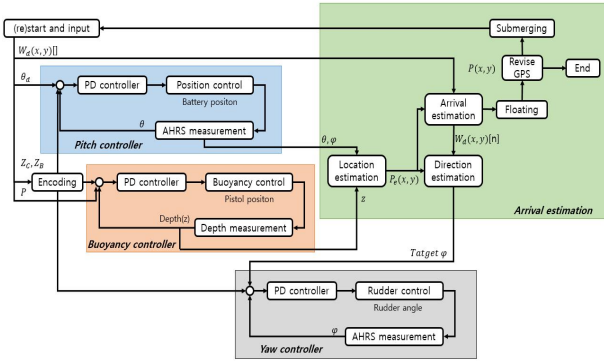


그림 11. 하이브리드 수중 글라이더의 제어 알고리즘
 Fig. 11. Control algorithm diagram of HUG.

그림 11은 HUG의 제어 알고리즘을 표현한 것이다. 초기 입력 데이터는 선체의 목표 pitch 및 운용 수심의 상/하한, 부력 제어량을 입력하며, 해양의 원하는 경유 위치를 입력해 준다. UG는 운용 환경이 각각 다르기 때문에 최소한의 운용 환경에 대한 데이터를 입력하는 것이다. 운항 방식은 출발점의 GPS 데이터와 첫 경유지의 위치를 확인하여 heading 각을 계산 후 지정된 부상 시간동안 heading 각을 따라 주항 후 다시 GPS를 보정하여 경유점의 반경까지 찾아가는 방식이다. 경유점의 반경에 들어오면 다음 경유점을 향해 다시 앞에서와 같은 방법으로 주항하도록 구동부들을 제어한다.

5-3 자세 제어 실험

자세 제어 실험에 앞서 선행된 시험이 두 가지가 있다. 첫 번째는 부력엔진의 성능을 확인하는 것이며, 두 번째는 선체를 음성 부력으로 맞춘 뒤 활강 Pitch를 측정하는 것이다. 이와 같이 두 가지의 실험을 실시한 뒤 자세 제어 시험을 진행하였으며, 모든 시험은 3 m × 4 m 크기의 외란이 없는 실내수조에 담수하여 진행하였다.

첫 번째 실험은 부력엔진의 성능을 확인하기 위한 실험이며, 부력엔진의 기동에 따른 선체의 Pitch 변화를 확인하였다. 실험 시에 자세제어기는 중립에 고정 후 부력엔진만 음성 부력을 가지도록 기동하였다. 부력엔진 성능 실험의 결과는 그림 13과 같다.

그래프의 파란색 선은 선체의 Pitch, 빨간색 선은 선체의 목표 부력수치이며, 검은색 선은 선체의 현재 부력수치이다. 결과를 보면 부력엔진 하강 구동 명령에 따라 피스톤이 중립으로부터 약 65 mm를 이동하였으며, 그로인해 선체의 부력이 낮아져 선수가 앞으로 기울어지며 수중으로 하향 활강하는 모습을 보인 뒤 부력엔진 상승 구동 명령에 따라 다시 선체가 수면에 뜨는 모습을 볼 수 있었다. 이 실험을 통하여 HUG에 장착된 부력엔진이 선체의 부력을 충분히 조절할 수 있음을 확인하였다.

두 번째 실험은 HUG에 장착된 자세제어기 구동으로 인한 무게 질량의 변화에 따른 선체가 활강하는 pitch의 변화를 측정하는 실험을 실시하였다. 실험 시에 부력엔진은 선체가 음성 부

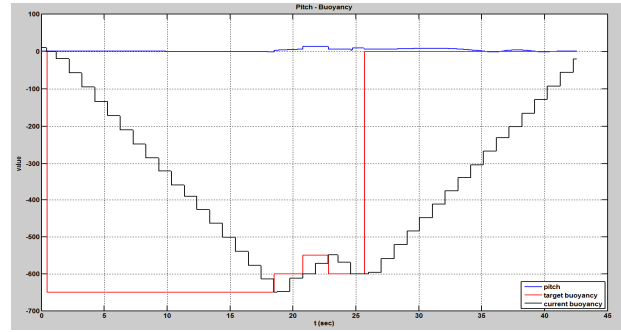


그림 13. 부력엔진 성능 실험의 결과
 Fig. 13. Performance test results of buoyancy engine.

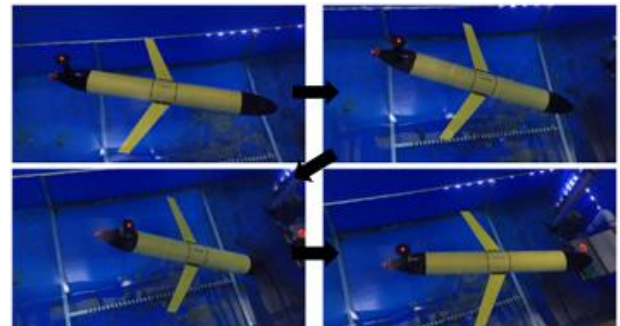


그림 12. 부력엔진 성능 실험
 Fig. 12. Performance test of buoyancy engine.

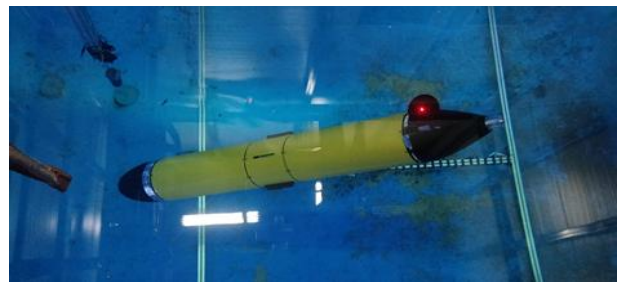


그림 14. 하이브리드 수중 글라이더의 Pitch 실험
 Fig. 14. Pitch test of HUG.

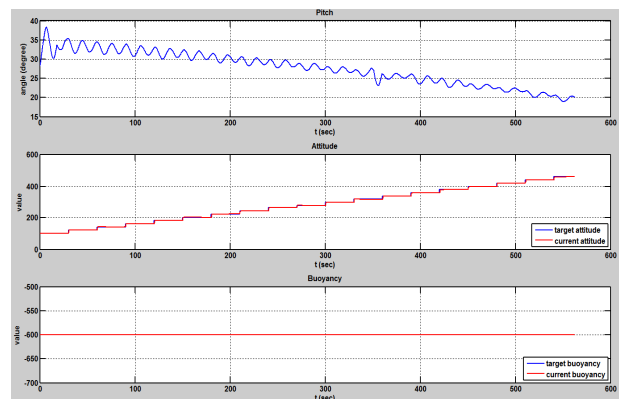


그림 15. 하이브리드 수중 글라이더의 Pitch 실험 결과
 Fig. 15. Pitch test results of HUG.

력을 갖도록 하한 고정 후 자세제어기만 정밀하게 일정 구간을 기동하게 하였다. 하지만 선체의 부력이 음성이면 선체가 물 밑으로 가라앉기 때문에 원활한 실험을 위해 선체 중앙에 줄을 달아 선체가 가라앉지 않도록 고정된 뒤 실험을 진행하였다.

선체의 pitch의 변화를 측정된 결과는 그림 15와 같다. 그림의 가장 상단 그래프는 선체의 pitch 변화를 나타내었으며, 중간 그래프는 자세제어기의 목표 수치와 현재 수치를 나타낸다. 또한 가장 하단의 그래프는 선체의 부력 수치를 나타낸 그래프이다. 위 3개의 그래프를 보면 자세제어기의 위치가 약 100 mm ~ 450 mm로 이동함에 따라 선체의 pitch가 약 35° ~ 20°로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이 실험을 통해 자세제어기의 위치에 따라 선체의 pitch를 대략적으로 추정 가능해졌다.

마지막 실험은 HUG의 자세 제어 실험을 실시하였다. 본 실험은 선행된 실험의 데이터를 바탕으로 선체의 pitch를 일정 수치로 유지할 수 있도록 PD제어기를 이용하여 자세제어기를 정밀하게 제어하는 실험이다. 초기 동작 시에 선체의 부력을 음성으로 만들기 위해 부력엔진을 하한으로 기동한 뒤 고정 시킨다. 그 뒤에 자세제어기를 기동하여 선체의 pitch를 약 25°로 제어하도록 설정하였다. 실험 결과는 그림 17과 같으며, 결과 그래프에서 보이듯이 선체의 pitch가 자세제어기의 PD제어기에 의해 약 90초 후에 목표 각도인 25°로 수렴됨을 확인하였다.

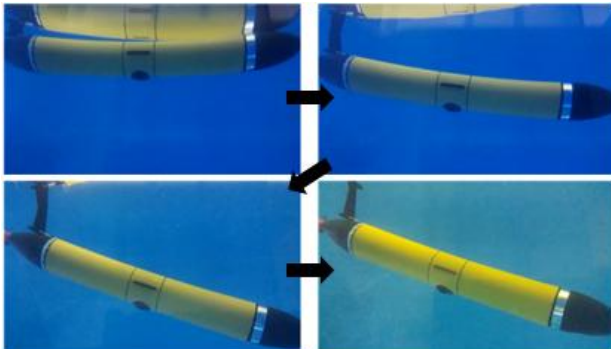


그림 16. PD 제어기를 이용한 pitch 제어 실험
Fig. 16. pitch control test using PD controller.

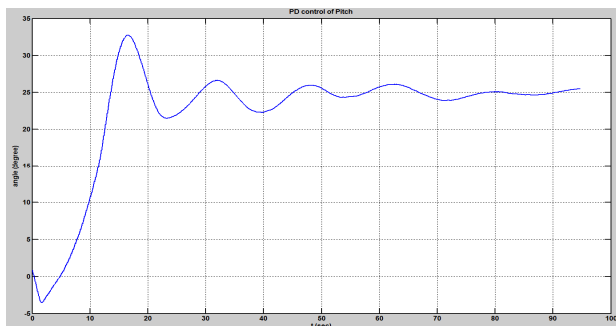


그림 17. PD 제어기를 이용한 pitch 제어 실험의 결과
Fig. 17. Results of pitch control test using PD controller.

VI. 결 론

본 논문은 UG에 외부 추진기가 장착되어 에너지 절감과 자체 추진을 통한 정밀 경로 탐색의 장점을 가진 HUG를 설계하였다. 그리고 내부의 구동부인 부력엔진과 자세제어기를 구동하고 각각의 센서 정보를 취득하기 위하여 하드웨어 제어시스템을 설계하였다. 또한 이를 정밀 제어하기 위하여 선체의 동역학 모델링을 실시하여 이를 바탕으로 제어 알고리즘을 구현하여 수조에서 HUG의 기초 성능 실험들을 수행하였다.

선체의 자세 제어 실험을 위해 선행적으로 부력엔진의 성능 확인 및 활강 pitch를 측정하는 실험을 진행하였다. 선체의 실험을 통해 부력엔진의 피스톤이 중립으로부터 약 65 mm를 이동하였을 때 선체가 음성 부력이 되어 하향 활강하는 모습을 확인하였다. 결과적으로 선체에 장착된 부력엔진이 부력을 조절하여 선체가 부상 및 잠항하는 것이 가능하였다.

또한 후자의 실험은 선체가 음성 부력 시에 자세제어기의 위치에 따른 pitch의 변화를 확인하였다. 자세제어기의 위치가 약 100 mm ~ 450 mm로 이동함에 따라 선체의 pitch가 약 35° ~ 20°로 변하는 것을 확인하였으며, 이 실험의 데이터를 바탕으로 자세제어기의 위치에 따른 선체의 pitch를 대략적으로 추정하는 것이 가능해졌다.

위의 두 실험을 완료한 후 자세 제어 실험을 수행하였다. PD 제어기를 설계하여 음성 부력인 선체의 자세제어기를 정밀하게 제어하여 선체의 목표 pitch가 25°가 되도록 제어하였다. 실험 결과 선체가 물속으로 잠항한 후 약 90초 후에 목표 각도인 25°로 수렴됨을 확인하였으며, 이를 통해 선체의 정밀 자세제어 알고리즘의 신뢰성을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 (NRF-2016R1A2B4011875) 지원 프로젝트의 일부이며, 또한 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양개발용 수중건설편로봇 사업단, PJT200539)

참고 문헌

- [1] J. J. Park, "Underwater gliders: Its applicability in the East/Japan sea," *Ocean and Polar Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 107-121, June 2013.
- [2] Y. S. Park, et al, "Report of east sea crossing by underwater glider," *The Sea*, Vol. 17, No. 2, pp. 130-137, May. 2012.
- [3] C. C. Eriksen, et al, "Seaglider: A long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp.

424-436, Oct. 2001.

[4] J. Sherman, et al, "The autonomous underwater glider "Spray"," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 437-446, Oct. 2001.

[5] D. C. Webb, J. S. Paul, and P. J. Clayton, "SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 447-452, Aug. 2001.

[6] E. Fiorelli, et al, "Multi-AUV control and adaptive sampling in Monterey Bay," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 935-948, Oct. 2006.

[7] N. E. Leonard, et al, "Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay," *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 6, pp. 718-740, Sep. 2010.

[8] R. N. Smith, et al, "Persistent ocean monitoring with underwater gliders: Adapting sampling resolution," *Journal of Field Robotics*, Vol. 28, No. 5, pp. 714-741, Aug. 2011.

[9] D. C. Seo, G. N. Jo, and H. S. Choi, "Pitching control simulations of an underwater glider using CFD analysis," *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, pp. 1-5, April 2008.

[10] S. K. Jeong, et al, "Design and control of high speed unmanned underwater glider," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 273-279, July 2016.

[11] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, New York: NY, John Wiley & Sons, 1994.



지 대 형 (Dae-Hyeong Ji)

2014년 2월 : 한국해양대학교 IT공학부 졸업 (공학사)
 2016년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업 (공학석사)
 2016년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 대학원 기계공학과
 ※관심분야 : 수중로봇, AUV, Underwater glider, 수중항법



최 형 식 (Hyeung-Sik Choi)

1989년 2월 : 미국 University of South Carolina 기계공학과 졸업 (공학석사)
 1993년 2월 : 미국 University of North Carolina 기계 및 항공공학과 졸업 (공학박사)
 1993년 ~ 1997년 : 한국기계연구원 (박사 후 연구원)
 1997년 5월 ~ 현재 : 한국해양대학교 기계공학부 교수
 ※관심분야 : 해양장비 및 수중로봇, 해양 무인화 시스템, 수중 가시광 통신



김 준 영 (Joon-Young Kim)

1993년 2월 : 인하대학교 조선해양공학과 졸업 (공학석사)
 1999년 2월 : 인하대학교 정밀기계공학과 졸업 (공학박사)
 2005년 ~ 2011년 : 제주대학교 해양시스템공학과 조교수
 2011년 ~ 현재 : 한국해양대학교 조선기자재공학부 부교수
 ※관심분야 : 해양장비 및 수중로봇, 해양 무인화 시스템, 무인잠수정



정 동 욱 (Dong-Wook Jung)

2015년 8월 : 한국해양대학교 기계공학부 졸업 (공학사)
 2016년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 대학원 기계공학과
 ※관심분야 : 수중로봇, AUV, USV, 수중항법



정 성 훈 (Seong-Hoon Jeong)

2004년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업 (공학석사)
 2007년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업 (공학박사)
 2003년 ~ 2010년 : 부산경상대학교 멀티미디어컴퓨터과 겸임교수
 2010년 ~ 현재 : 한국해양대학교 산업기술연구소 산학연구교수
 ※관심분야 : 해양 무인화 시스템, 해양 IoT, 해상통신, ICT 융·복합 기술