



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

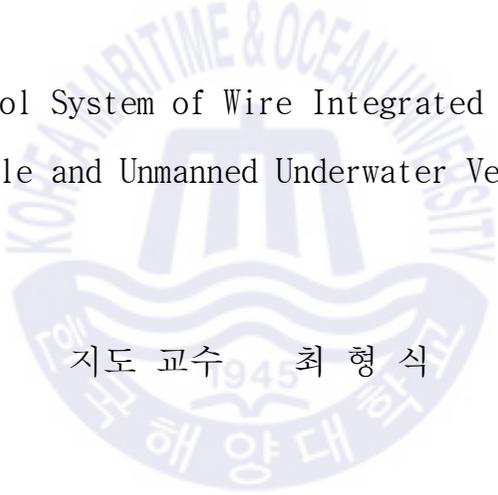
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

무인수상정과 무인잠수정의  
유선 결합 플랫폼 제어시스템 연구

A Study on Control System of Wire Integrated Unmanned Surface  
Vehicle and Unmanned Underwater Vehicle



지도 교수 최 형 식

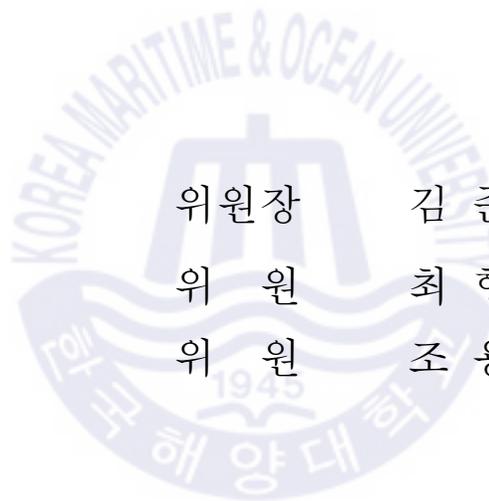
2020년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

조 현 준

본 논문을 조현준의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장	김 준 영
위 원	최 형 식
위 원	조 용 성



2019년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	v
List of Figures .....	vii
Abstract .....	xi

## 1. 서 론

1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	3
1.3 논문 구성 .....	5

## 2. 복합 플랫폼 외부 구조 설계

2.1 복합 플랫폼 구성 .....	7
2.1 무인수상선 구조 .....	9
2.2 무인잠수정 구조 .....	13
2.3 원치시스템 구조 .....	16

## 3. 복합 플랫폼 세부 구성

3.1 무인수상정 .....	17
3.1.1 무인수상정 전원부 .....	17
3.1.2 무인수상정 제어부 .....	22
3.1.2 무인수상정 센서부 .....	25
3.2 무인잠수정 .....	28
3.2.1 무인잠수정 전원부 .....	28
3.2.2 무인잠수정 제어부 .....	31

3.2.3 무인잠수정 센서부 .....	34
3.3 원치시스템 제어부 .....	35
3.4 운용 시스템 .....	36
3.4.1 운용 콘솔 .....	36
3.4.2 운용 GUI 프로그램 .....	37
<b>4. 복합 플랫폼 통합 제어 시스템</b>	
4.1 복합 플랫폼 통신 시스템 .....	39
4.1.1 운용 콘솔 - USV 통신 시스템 .....	40
4.1.2 USV - UUV 통신 시스템 .....	43
4.1.3 복합 플랫폼 내부 통신 프로토콜 .....	44
4.2 무인수상정 경로 추종, 동적 위치 제어 .....	45
4.3 무인잠수정 상대 방향각, 상대 거리 제어 .....	49
4.4 복합플랫폼 자동 복귀 제어 .....	51
4.5 복합플랫폼 추진 제어 시스템 .....	52
<b>5. 센서 성능 실험 및 실험역 실험</b>	
5.1 센서 성능 실험 .....	54
5.1.1 USBL 실험 .....	54
5.1.2 AHRS 실험 .....	56
5.2 복합 플랫폼 실험역 성능 실험 .....	58
5.2.1 AP-bridge 통신 장비 실험 .....	59
5.2.2 플랫폼 구동 시간 실험 .....	60
5.2.3 플랫폼 자동 복귀 실험 .....	62
5.2.4 상대 거리 제어 실험 .....	63
5.2.5 동적 위치 제어 실험 .....	65
5.2.6 경유점 추종 제어 실험 .....	69

6. 결론 .....	77
부록 A 동역학 모델링 및 시뮬레이션 .....	79
부록 B 제어 구성품 및 회로 .....	97
참고문헌 .....	104
감사의 글 .....	106



## List of Tables

<b>Table 1.1</b>	Characteristics of Ocean survey platforms .....	2
<b>Table 2.1</b>	USV hull resistance with flow rate .....	12
<b>Table 2.2</b>	Specifications of USV thrusters .....	12
<b>Table 2.3</b>	Specifications of UUV thrusters .....	14
<b>Table 3.1</b>	Specifications of DC-AC inverter .....	21
<b>Table 3.2</b>	Specifications of AC-DC power supply .....	21
<b>Table 3.3</b>	Specifications of CY8CKIT-059 Board .....	25
<b>Table 3.4</b>	Specifications of GPS .....	26
<b>Table 3.5</b>	Specifications of MTI-30 AHRS .....	27
<b>Table 3.6</b>	Specifications of SeaTrac USBL .....	28
<b>Table 3.7</b>	Specifications of UUV DC-DC converter .....	29
<b>Table 3.8</b>	Specifications of Depth sensor .....	34
<b>Table 3.9</b>	Specifications of StarFish 453 side scan sonar .....	35
<b>Table 4.1</b>	Specifications of AP Bridge communication device .....	41
<b>Table 4.2</b>	Specifications of communication hub .....	41
<b>Table 4.3</b>	Specifications of Serial - Ethernet device .....	42
<b>Table 4.4</b>	Specifications of PLC device .....	44
<b>Table 5.1</b>	USBL test results .....	55
<b>Table 5.2</b>	Specification of the heading reference GPS .....	56
<b>Table 5.3</b>	Result of operation time test .....	61
<b>Table 5.4</b>	Coordinates for way point tracking control .....	69
<b>Table A.1</b>	Notation of SNAME for marine vehicles .....	81

<b>Table A.2</b>	Vectorial notations used to express transformation matrix .....	82
<b>Table A.3</b>	Beaufort numbers and their corresponding wind speeds .....	92
<b>Table B.1</b>	Specifications of USV battery .....	97
<b>Table B.2</b>	Specifications of Winch BLDC motor .....	98
<b>Table B.3</b>	Specific details of Winch motor driver .....	98
<b>Table B.4</b>	Specifications of MINI PC in USV .....	99
<b>Table B.5</b>	Specifications of USV front camera .....	100
<b>Table B.6</b>	Specifications of USV rear camera .....	100
<b>Table B.7</b>	Specifications of UUV underwater camera .....	101



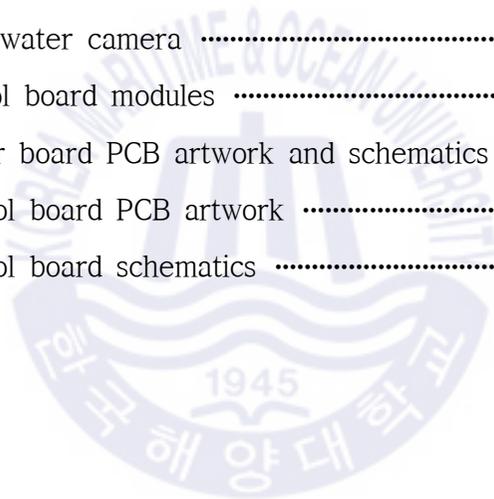
## List of Figures

Fig. 1.1 Purpose of integrated platform's UUV .....	4
Fig. 1.2 Operation concept and expected results .....	5
Fig. 2.1 Components of integrated system .....	7
Fig. 2.2 Configuration of integrated platform .....	8
Fig. 2.3 Assembled USV and components .....	9
Fig. 2.4 Structures for battery and control box .....	10
Fig. 2.5 Stability curve of USV .....	10
Fig. 2.6 Multiphase flow field model for USV .....	11
Fig. 2.7 Result of CFD analysis .....	11
Fig. 2.8 Thruster of USV .....	12
Fig. 2.9 3D modeling of UUV .....	13
Fig. 2.10 Thruster of UUV .....	14
Fig. 2.11 Pictures of assembled UUV .....	15
Fig. 2.12 Configuration of inner structure of cylinder .....	15
Fig. 2.13 Configuration of winch system .....	16
Fig. 3.1 Diagram of USV power system .....	17
Fig. 3.2 Main power box of USV .....	18
Fig. 3.3 Thruster power box of USV .....	19
Fig. 3.4 DC-DC converter box of USV .....	20
Fig. 3.5 DC-AC inverter and AC-DC power supply used in USV .....	21
Fig. 3.6 Diagram of USV control components .....	22
Fig. 3.7 Control box of USV .....	23

Fig. 3.8	Diagram of USV control system .....	24
Fig. 3.9	CY8CKIT-059 board .....	24
Fig. 3.10	Diagram of UUV power system .....	29
Fig. 3.11	Aluminum heat sink and power converter board in UUV .....	30
Fig. 3.12	Assembled power board of UUV .....	31
Fig. 3.13	3D Layout of UUV control system .....	32
Fig. 3.14	Configuration of assembled UUV control system .....	32
Fig. 3.15	Diagram of UUV control system .....	33
Fig. 3.16	Operating console for integrated platform .....	36
Fig. 3.17	Operation GUI program for integrated system .....	37
Fig. 4.1	Diagram of integrated platform control system .....	38
Fig. 4.2	Schematic diagram of communication system .....	39
Fig. 4.3	Diagram of operation center - USV communication system .....	40
Fig. 4.4	Placement of AP Bridge .....	40
Fig. 4.5	Serial - Ethernet device .....	42
Fig. 4.6	Schematic diagram of USV-UUV communication .....	43
Fig. 4.7	PLC device .....	44
Fig. 4.8	Communication packet form of integrated platform .....	45
Fig. 4.9	Algorithm flow of way point tracking and dynamic positioning control	46
Fig. 4.10	Diagram for integral Anti-windup .....	47
Fig. 4.11	Method for sign decision .....	48
Fig. 4.12	Diagram for tracking control .....	49
Fig. 4.13	Graphical description of $\psi_{REL}$ and $d_{REL}$ .....	50
Fig. 4.14	Algorithm for self return .....	51
Fig. 4.15	Thrust control diagram .....	53
Fig. 5.1	USBL test in water tank .....	54

Fig. 5.2	Result of GPS and AHRS test .....	57
Fig. 5.3	Field test .....	58
Fig. 5.4	Communication range and speed test .....	59
Fig. 5.5	Result of self return test .....	62
Fig. 5.6	Relative distance control test zone .....	63
Fig. 5.7	USV path and USBL data of relative distance control test .....	64
Fig. 5.8	USBL and Depth sensor data of relative distance control test ..	64
Fig. 5.9	Trajectory of the platform while dynamic positioning .....	65
Fig. 5.10	Attitude values of USV, UUV while DP .....	66
Fig. 5.11	USV heading error while DP .....	67
Fig. 5.12	USV distance error while DP .....	67
Fig. 5.13	USV thrust input values while DP .....	68
Fig. 5.14	heading data of USV, UUV while DP .....	68
Fig. 5.15	Trajectory of the platform while way point tracking .....	69
Fig. 5.16	Enlarged trajectory while way point tracking .....	70
Fig. 5.17	Platform trajectory near way points .....	71
Fig. 5.18	Attitude values of USV, UUV while WP .....	72
Fig. 5.19	USV heading error while WP .....	73
Fig. 5.20	USV distance error while WP .....	73
Fig. 5.21	USV thrust input values while WP .....	74
Fig. 5.22	Heading data of USV, UUV while WP .....	74
Fig. 5.23	USV path and USBL data .....	75
Fig. 5.24	Acquired side scan sonar data while way point tracking .....	76
Fig. A.1	Earth-fixed and body-fixed coordinate system .....	80
Fig. A.2	Thrust curve between CW direction rpm and thrust .....	86
Fig. A.3	Thrust curve between CCW direction rpm and thrust .....	87

Fig. A.4	Coordinates and representation for environmental forces .....	90
Fig. A.5	Structure of simulation program .....	94
Fig. A.6	Surge motion and turning motion simulation result .....	94
Fig. A.7	Turning motion and wind driven forces .....	95
Fig. A.8	Simulation result of way point tracking .....	96
Fig. B.1	Battery of USV .....	97
Fig. B.2	Winch BLDC motor and motor driver .....	98
Fig. B.3	MINI PC in USV .....	99
Fig. B.4	USV front camera and rear camera .....	99
Fig. B.5	UUV underwater camera .....	100
Fig. B.6	USV control board modules .....	101
Fig. B.7	UUV power board PCB artwork and schematics .....	102
Fig. B.8	UUV control board PCB artwork .....	102
Fig. B.9	UUV control board schematics .....	103



# A Study on Control System of Wire Integrated Unmanned Surface Vehicle and Unmanned Underwater Vehicle

Hyun Joon Cho

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

Exploring ocean comes with certain limitations such as environmental disturbances, cost constraints and communication difficulties. As vast the ocean is, environments of mission areas differ widely. Hence, it is common to use platforms that meet needs of specific goals and mission areas. In this study, we designed a new platform that combines advantages of previously commercialized platforms in order to achieve reasonable coastal survey solution and real-time underwater exploration. The platform consists of unmanned surface vehicle (USV) and unmanned underwater vehicle (UUV), and both platforms are integrated via tether cable. This study introduces design, control and field experiments including sensor performance tests of the integrated platform.

In order to withstand environmental disturbances such as waves and ocean currents, hull of USV is designed as catamaran-type with excellent resilience and surge motion capabilities. The USV is equipped with Global Positioning System (GPS) device and Ultra Short Base Line(USBL) device to estimate UUV's relative distance and orientation.

The UUV is designed in the torpedo-type shape to minimize underwater resistance. The UUV is equipped with underwater camera and side scan sonar. Data acquired by these sensors are processed and transmitted to USV in real time. Also, UUV has 4 thrusters to control its attitude and position

The USV is controlled to perform way point tracking and dynamic positioning. When carrying out these control methods, anti-windup PID control and weight scheduling method was used in order to achieve both straight motion and turning motion effectively with two main thrusters attached to the rear of the USV hull.

The UUV could be operated manually to acquire underwater camera vision or could set as autonomous control mode to cooperated with USV. The UUV has two autonomous control methods; that are relative heading angle control and relative position control. Operator can decide which control method to use, factoring the goal of the mission.

Attitude and position values of UUV are dependent to Attitude/Heading Reference System(AHRS) and USBL sensor. To ensure the integrity of UUV control performance, AHRS and USBL test were conducted.

Finally, the performance of the platform controller and hardware capability of the platform; (e.g. communication capability, operation hours and real-time underwater data acquisition) were verified through the field test. The results of the dynamic positioning experiment confirmed that the location can be maintained within 3 m from the set point. The result of way point control shows that platform could follow points within 4 m of distance errors. In addition, the control performance of UUV was confirmed through AHRS heading angle data and the USBL distance data. Through these tests, good performance of designed control system was shown.

**KEY WORDS:** Unmanned Surface Vehicle, Unmanned Underwater Vehicle, Integrated system, Control System Development, Field test.

# 제 1 장 서 론

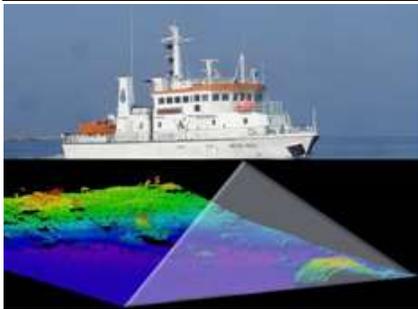
## 1.1 연구배경

해양 개발의 역사는 인류 발전과 함께 했지만 최근 해상 교통로로서의 중요성, 항행시의 안전 등 지정학적 이유와 조력, 파력, 해상 풍력 발전 및 수중의 자원 확보 등 에너지 측면에서의 중요성으로 매년 시장 규모와 개발 투자금액이 커지고 있다. 이에 따라 다양한 국가에서 해양 조사 및 수중 구조물 관리를 위한 해양 플랫폼을 개발하고 운용하는 연구를 수행하고 있다.[1]

해양 플랫폼의 운용은 그 특수한 성격으로 여러 가지 제약을 가진다. 수상에서는 파도와 바람 등의 기상상태로 인한 환경적 제약과 육지에서 탐사거리가 멀어지면 멀어질수록 보급의 어려움과 이동하는 기간 동안의 비용 제약이 있다. 수중에서는 가시거리의 제한, 해류, 압력, 해수부식 등 복합적인 장애 요소가 존재한다. 또한, 해수는 공기의 약 1000배에 달하는 밀도와 쉽게 예측하기 힘든 해류는 플랫폼의 제어를 어렵게 하며 공기 중에서의 전파통신, 위성통신 등 일반적인 통신 방식, 위치 측위방식이 어렵다[2][3]. 따라서 구체적인 목표와 임무 지역에 따라 사용하는 플랫폼이 다양하게 개발되었다[4].

Table 1.1은 수면에서 조사하는 대표적인 플랫폼인 선박(Ship), 무인수상정(Unmanned Surface Vehicle, USV), 수중예인체(Towfish)와 수중에서 조사하는 유선 원격조종 무인잠수정(Remotely Operated Vehicle, ROV), 자율 무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle, AUV), 수중 글라이더(Underwater Glider), 전문 다이버(Diver) 순으로 그 특징들을 나타내었다. 수면에서의 조사는 GPS(Global Positioning System)의 도움으로 정확한 위치를 알 수 있다는 공통적인 장점이 있고 수중 조사 플랫폼들은 탐사 목표에 가까이 갈 수 있는 만큼 결과의 해상도와 신뢰도가 높다는 공통적인 장점이 있다.

**Table 1.1** Characteristics of Ocean survey platforms

Platform	Characteristics
 <p data-bbox="248 658 474 687">Ship(Jakob Hägg)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Survey wide range of area</li> <li>▶ Relatively Fast speed</li> <li>▶ Has survey depth limit</li> <li>▶ High Cost, Big size</li> </ul>
 <p data-bbox="248 1006 474 1035">USV(C-ENDURO)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Cost effective relative to ship</li> <li>▶ Limited operation time</li> <li>▶ Has survey depth limit</li> <li>▶ Vulnerable to weather conditions</li> </ul>
 <p data-bbox="248 1354 474 1383">Towfish(L3-Klein)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Need a mothership</li> <li>▶ May have attitude, position errors</li> <li>▶ Able to sweep data</li> <li>▶ Require certain speed, linearity</li> </ul>
 <p data-bbox="248 1692 474 1723">ROV(Mohawk)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ High degrees of freedom</li> <li>▶ Proximity investigation on target</li> <li>▶ Real time data via tether cable</li> <li>▶ Need professional operator</li> </ul>

Platform	Characteristics
 <p data-bbox="244 581 481 614">AUV(REMUS 100)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Can specify survey area, course</li> <li>▶ Operation time limit</li> <li>▶ Navigational error</li> <li>▶ Difficult to transmit real time information</li> </ul>
 <p data-bbox="244 929 481 962">Glider(Spray Glider)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Long operation time</li> <li>▶ Wide coverage area</li> <li>▶ Payload limitations</li> <li>▶ high loss possibility</li> </ul>
 <p data-bbox="244 1277 481 1309">Diver(US NAVY)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Able to do elaborate works with hand</li> <li>▶ On-field decisions are possible</li> <li>▶ Danger of human injury or death</li> <li>▶ Limited operation time</li> </ul>

## 1.2 연구목적

본 연구에서는 USV, 수중예인체, ROV의 다음과 같은 장점 ①선박과 비교하여 USV의 적은 운용비용. ② 수중예인체가 해양 탐사를 수행할 때 조사 대상에 접근하여 순항하며 넓은 지역의 소나 데이터를 얻을 수 있는 점. ③ ROV가 가진 제어 자유도와 데이터의 실시간 전송이 가능한 점을 더한 새로운 형태의 복합 플랫폼을 연구하였다. 이러한 장점들을 구현하기 위하여 수상, 수중에서 구동하는 별도의 플

플랫폼을 개발하고 이를 결합시킨 복합 플랫폼의 외부 구조와 제어 시스템을 설계하고 제작하였다. 제작한 복합 플랫폼의 제어 알고리즘을 개발하고 다수의 실험역 실험을 수행하며 성능을 검증하였다.

복합 플랫폼은 USV에 수중케이블을 통해 수중잠수체(Unmanned Underwater Vehicle, UUV, 무인잠수정)를 결합하여 잠수체로의 전원을 공급하고 잠수체가 수신한 실시간 수중 데이터를 취득하는 특징을 가진다. USV에 GPS를 부착하여 USV의 위치정보를 수신하고 USBL(Ultra Short Base Line)장비를 사용하여 USV에 대한 UUV의 상대 거리와 상대 방향각에 대한 정보를 얻음으로써, 관성항법을 사용하는 기존의 UUV가 갖는 위치오차를 줄이고자 한다[5].

복합 플랫폼에서 UUV는 기존의 수중 예인체만 사용했을 때 발생할 수 있는 각도 오차와 거리 오차를 추진기를 이용해 능동적으로 보상할 수 있게 하고자 하였고 잠수체의 심도를 제어하여 조사대상에 접근해 고 해상도의 수중 데이터를 취득하고자 한다. UUV의 능동 보상 개념을 Fig. 1.1에 나타내었다.

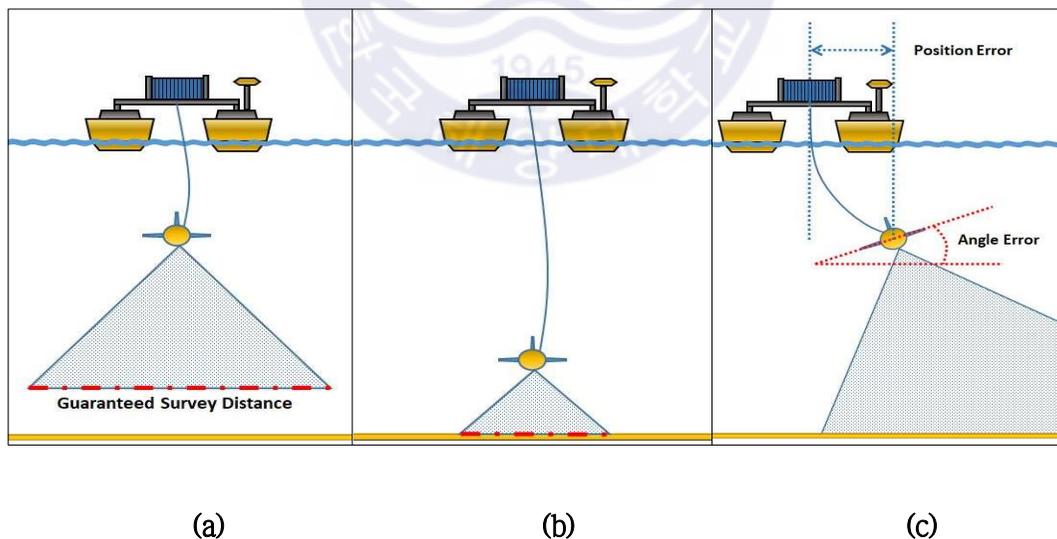


Fig. 1.1 Purpose of integrated platform's UUV (a), (b) SSS beam reachability differences (c) Occurring errors when using towfish platform

앞서 서술한 장점들을 활용해 연안에서의 해양 구조물 조사 및 관리, 연안 측량 및 수로 측량(해저면 지질, 지형 조사)을 효율적으로 수행 할 수 있는 플랫폼을 개발하고자 하였으며 제작한 외부 구조나 제어 시스템의 목표조건들도 연안에서의 사용을 가정하고 정해졌다. UUV는 측면주사음향측심기(Side Scan Sonar, SSS)를 탑재하여 수중 지형정보를 취득하게 되며 Fig. 1.2에 연안 측량시 운용 개념과 예상 결과물을 나타낸다.

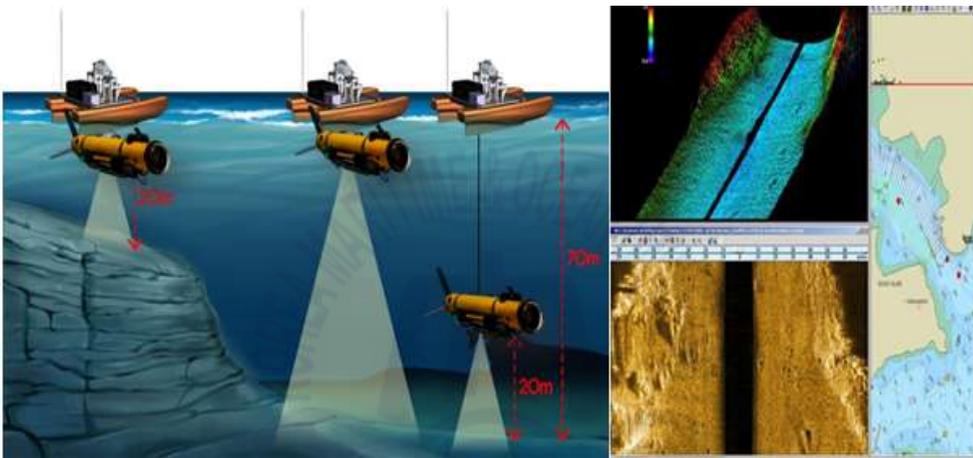


Fig. 1.2 Operation concept and expected results

### 1.3 논문 구성

본 논문은 다음과 같이 구성된다.

#### 2장 : 복합 플랫폼 외부 구조 설계

본 연구에서 개발한 복합 플랫폼은 USV와 UUV가 수중케이블로 연결되며 이를 운용하고 실시간으로 플랫폼 데이터를 수신할 휴대용 운용 콘솔로 구성되어 있다. USV, UUV, UUV의 수심 제어를 담당할 윈치의 구조와 설계를 설명하였다.

### 3장 : 복합 플랫폼 세부 구성

복합 플랫폼의 하드웨어 구성을 전원 시스템, 제어 시스템, 통신 시스템으로 세분화 하여 서술하고 플랫폼의 운용을 위한 운용 콘솔과 운용 프로그램을 설명한다.

### 4장 : 복합 플랫폼 통합 제어 시스템

먼저, 본 연구에서 개발한 복합 플랫폼 통합 제어를 위한 구성 요소 간의 통신 시스템을 설명한다. 플랫폼의 구성 중 하나인 USV의 주요 제어 기능인 경유점 추종 제어와 동적 위치 제어의 대하여 서술하였고 UUV 제어 기능인 상대 방향각 추종, 상대 거리 제어 알고리즘을 설명하였다. 또한, 유사시를 대비한 자동 복귀 기능의 알고리즘 흐름을 설명하였고, 위의 기능들을 수행할 추진 제어 시스템에 대해 나타내었다.

### 5장 : 센서 성능 실험 및 실험역 실험

UUV의 위치, 방향각 데이터는 USBL, AHRS에 의존하므로 제어 성능 확보를 위해 수행한 개별 센서 실험의 과정과 결과를 설명하였다. 또한 완성된 복합 플랫폼의 하드웨어와 주요 제어 기능 실험 결과들을 정리하여 나타내었다.

### 6장 : 결론

본 연구의 주요 결과를 정리하여 나타내었다.

### 부록 :

실험 전 플랫폼의 거동과 제어기의 성능을 확인하기 위해 복합 플랫폼의 동역학 모델을 유도하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 본 연구에서 사용되었으나 본문에서 설명하지 않은 장비의 상세 사항과 외형을 나타내었고 USV와 UUV의 제어 보드에 관한 회로도와 설계된 PCB를 나타내었다.

## 제 2 장 복합 플랫폼 외부 구조 설계

### 2.1 복합 플랫폼 구성

본 연구에서 개발한 복합 플랫폼의 구성은 아래 Fig. 2.1와 같다. 복합 플랫폼은 크게 USV, 윈치, 수중케이블, UUV, 운용콘솔로 구성된다. USV는 쌍동선형 선체를 가지며 통합제어시스템, 3개의 추진기, 윈치 시스템으로 구성되고 UUV는 제어시스템과 추진기, 그리고 해양 관측센서로 구성되며, 통합관제 및 제어용 운용 콘솔은 데이터를 취득하고 플랫폼을 제어할 GUI(Graphical User Interface) 기반의 운용 프로그램과 상용 PC 메인보드 기반의 하드웨어로 구성되어있다. 완성된 복합 플랫폼의 USV와 UUV의 외관은 Fig.2.2에 나타내었다.

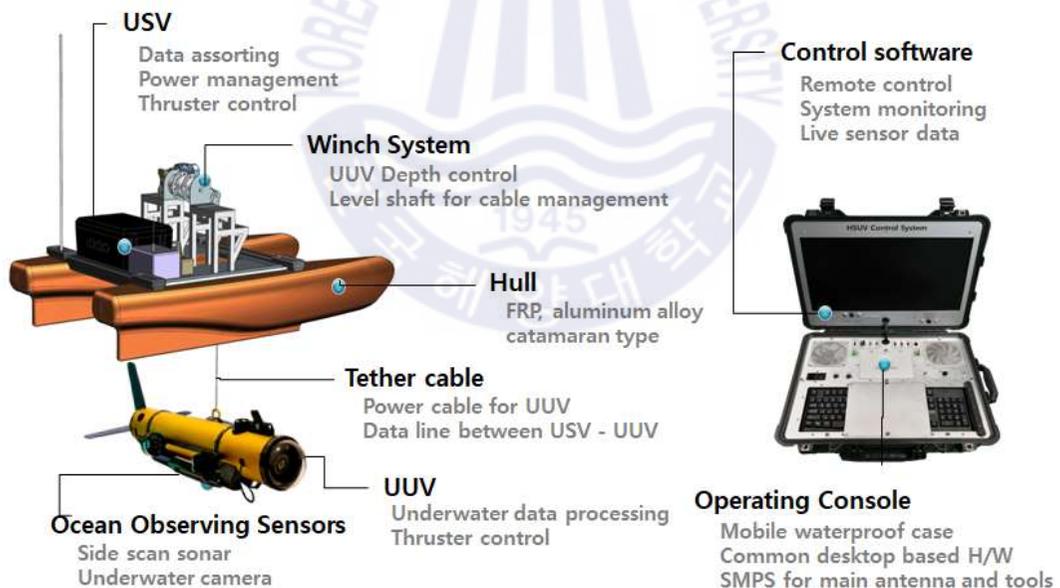


Fig. 2.1 Components of integrated system

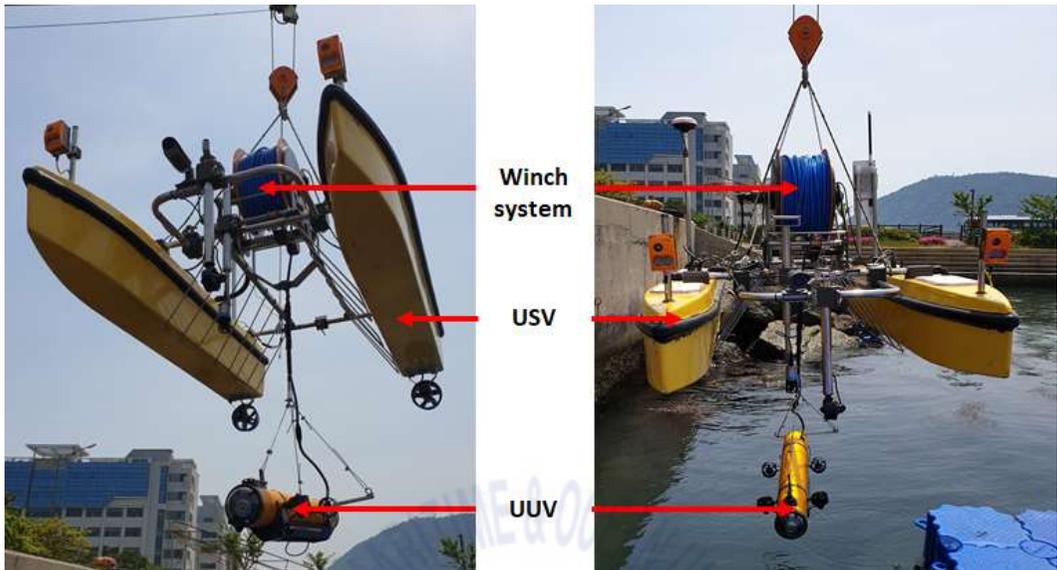


Fig. 2.2 Configuration of integrated platform

USV는 복합 플랫폼에서 크게 세 가지 역할을 수행한다. 첫째로 복합 플랫폼에서 UUV를 통해 취득한 소나 데이터, 영상 데이터 등 수중 데이터를 수상의 데이터들과 취합해 육상으로 전송하는 통신 허브로서의 역할을 수행한다. 둘째로 플랫폼 탑재 센서들과 액추에이터를 운용하기 위한 시스템 전체의 전원을 관리하고 필요에 따른 전원분배를 담당한다. 마지막으로 탐사 경로 추종(Way Point Tracking), USV가 지도상의 특정 좌표를 유지하게 함으로써 UUV의 단독 작업을 가능케 하는 동적 위치 제어(Dynamic Positioning, DP) 등의 탐사 목적에 따른 제어를 수행한다.

UUV는 복합 플랫폼에서 크게 두 가지 역할을 수행한다. 첫째로 수중탐사를 위한 SSS와 수중 카메라 데이터들을 처리해 USV로 전송하는 역할을 수행한다. USV의 원치와 UUV의 음성부력으로 인해 수심제어가 가능하여 조사대상에 접근해 고해상도의 데이터를 수신할 수 있고 수심에 따른 지형정보의 오차를 줄일 수 있다. 둘째로 USV, UUV의 센서 데이터를 수신하고 선체에 부착된 추진기로 USV와의 상대 거리, 상대 방향 제어를 수행한다.

## 2.2 무인수상정 구조

본 논문에서 사용된 USV의 선체는 파도, 해류의 변화 등 해양활동이 활발하게 일어나는 연안 지역에서의 운용을 고려해 복원력이 우수한 쌍동선형 선체를 사용했다. 경량화, 내해수성을 위해 FRP재질로 제작하였으며 선체 사이에 선체를 고정하는 지지대와 원치가 배치된다. 완성된 USV의 외관은 Fig. 2.3에 나타내었다. 선체 전체 길이와 폭은 이동과 실험의 편의를 위해 길이와 폭이 1톤 트럭 화물칸의 크기를 초과하지 않도록 2400mm 폭 1400mm 로 설계하였다.

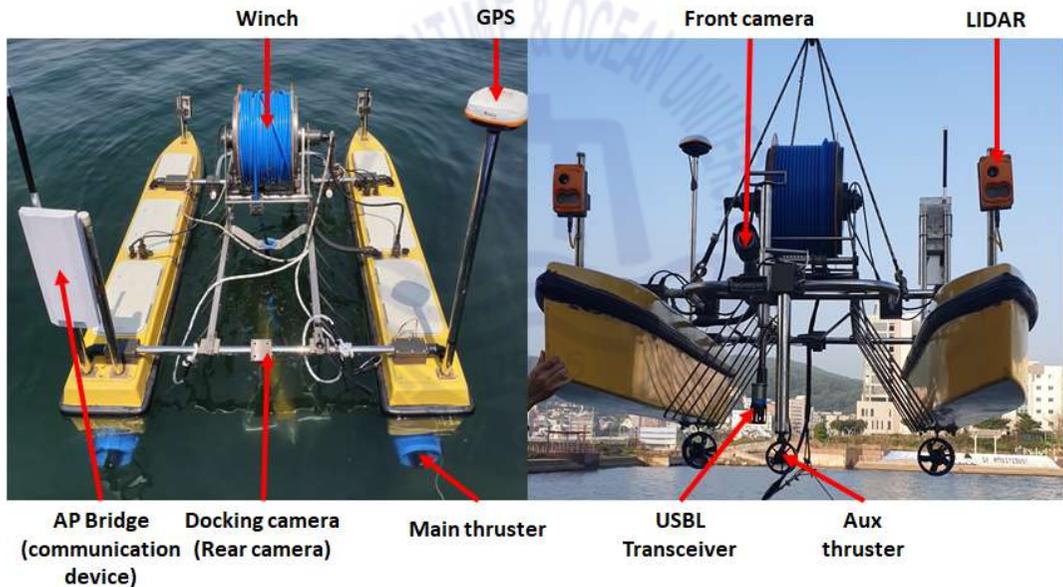


Fig. 2.3 Assembled USV and components

선체 내부 바닥면에는 배터리나 제어 장비들을 고정하기 위해 레일형 구조물을 설치했고 배터리 주위도 프로파일로 커버를 만들어 박스형 모듈, 제어 부품 등을 부착하기 편하게 했다. 바닥면의 구조물과 배터리 커버는 Fig. 2.4에 나타냈다.



Fig. 2.4 Structures for battery and control box

본 논문에서 제안하는 플랫폼은 파도, 해류의 변화 등 환경영향을 받는 연안에서 사용을 목적으로 하고 있으므로 복원력이 중요하다. 선체의 선형 설계와 해석은 조선기자재연구원에서 진행했으며 선체의 복원력은 복원성 정유체 계산을 통해 구하였고 USV 선체는 약 20도에서 복원력  $93.5\text{kg} \cdot \text{m}$ 가 발생하는 것을 확인 하였다. 아래 Fig. 2.5 은 롤 각도에 따른 안정도 곡선이다.[6]

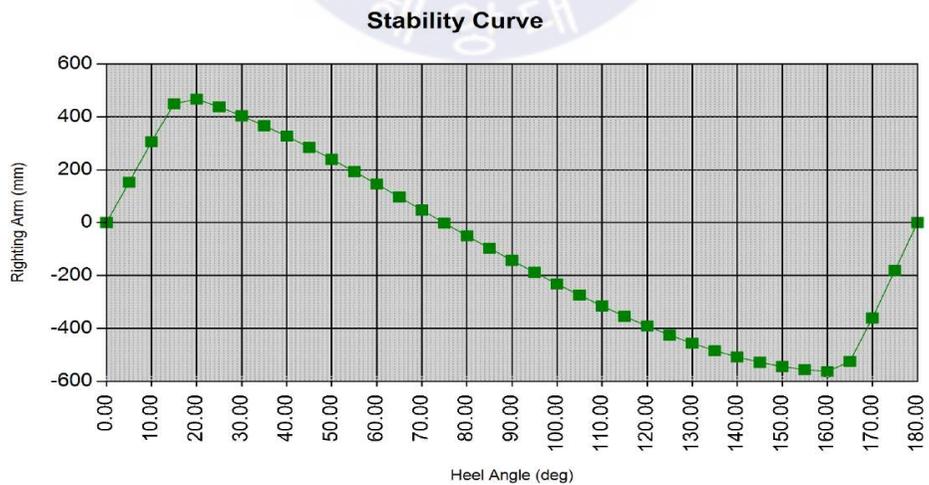


Fig. 2.5 Stability curve of USV

USV에 부착된 주 추진기는 유동해석을 통해 선체의 저항을 구하고 필요 출력을 결정하여 선정하였다. 유동해석 결과는 한국조선기자재 연구원의 다상유동 해석 결과를 참고하여 선정 했고 다상유동 모델은 Fig. 2.6에, 해석 결과는 Fig. 2.7에, 구체적인 수치는 Table 2.1에 나타내었다.

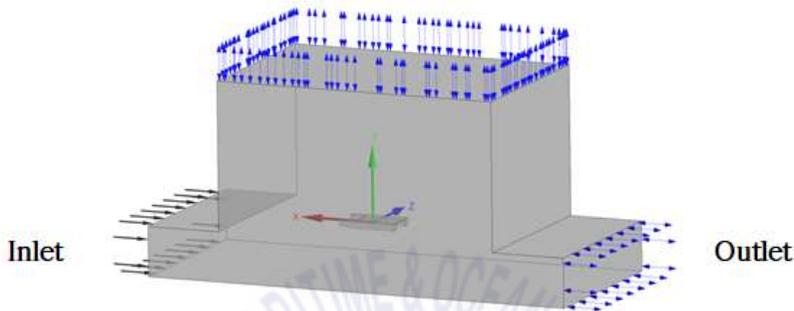


Fig. 2.6 Multiphase flow field model for USV

모델의 위쪽벽면은 공기가 유입 또는 유출될 수 있는 열린면으로 설정하였고 우측의 출구면(Outlet)에서 공기가 자유출입 가능한 열린면으로 대기압을 부여했다. 자유표면에서 거동을 해석하기 위해 등균질 다상유동모델을 사용하였다.

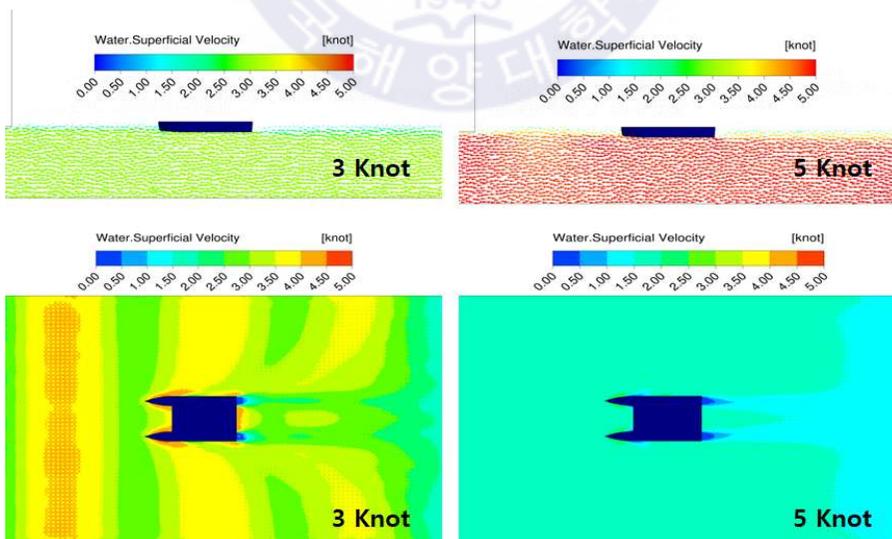
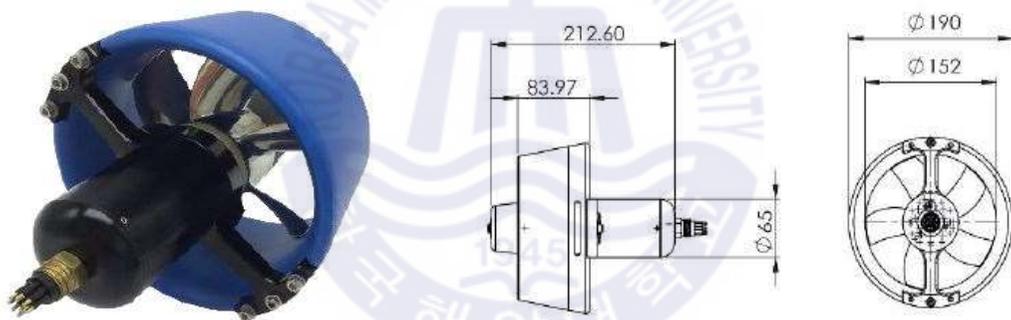


Fig. 2.7 Result of CFD analysis

**Table 2.1** USV hull resistance with flow rate

Flow rate(kts)	CFD(N)
2.0	27.424
3.0	60.235
4.0	109.46
5.0	179.41

유동해석 프로그램은 ANSYS CFX를 사용하였고 비정상상태(Unsteady state)로 400초 계산하였다. 물, 공기 2상의 다상유동해석 기법으로 유속(2, 3.0, 4.0, 5.0kts)에 따른 선체의 저항을 예측하였다. 선정된 추진기의 외관은 Fig. 2.8에 나타내었고 제원은 Table 2.2에 나타내었다.



**Fig. 2.8** Thruster of USV

**Table 2.2** Specifications of USV thrusters

Net Weight	2.8 kg (Air)	1.5 kg (Water)
Thrust	12.5 kg f	6 kg f
Materials	AL 6061-T7, MC Nylon, Stainless steel	
Input Power	10.3A @ 300VDC	
Speed Control	RS 485 / +5V ~ -5VDC analog	

## 2.2 무인잠수정 구조

본 논문에서 UUV는 주로 예인체로써 역할을 수행하게 되므로 예인 시 저항을 최소화하기 위해 어뢰형 형상으로 설계되었다. 선체 외부는 내 부식성과 경량화를 위해 양극 산화 처리된 알루미늄으로 제작되었으며 선체는 선수부(Bow side), 내압 용기(Cylinder), 후미부(Stern side)로 3개의 영역으로 나누어지며 내압 용기 하단의 SSS 고정대가 전체 영역들을 고정해주는 역할을 수행한다. UUV 선체의 구분된 영역은 Fig. 2.9에 나타내었다.

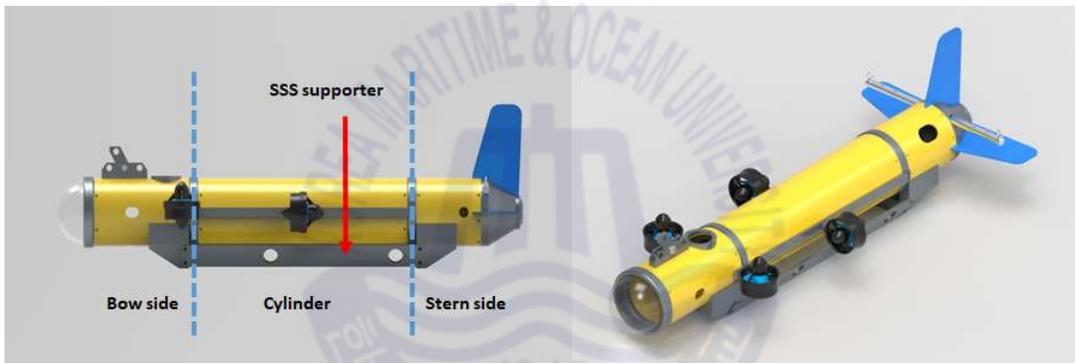


Fig. 2.9 3D modeling of UUV

선수부는 영상 촬영을 위한 투명한 플라스틱 노즈콘, 수중케이블 지지대, USBL Transponder로 구성된다. 내압 용기는 단일 실린더 구조로써 내부에 제어 전장이 배치되며 선수부 뚜껑엔 추진기 커넥터 2개, 사이드스캔소나 Transducer 커넥터 2개, 카메라 커넥터 2개, USBL Transponder 커넥터 1개가 부착되고, 후미부 뚜껑엔 수중케이블 커넥터, 추진기 커넥터 2개, 누수 확인용 환기 플러그, 수심 측정 센서 (Depth sensor) 가 부착된다. 후미부는 수중케이블이 통과할 원형 구멍, 자세각 안정을 위한 뒷 수평날개와 꼬리날개, 수중케이블 지지대로 구성된다. 완성된 외관은 Fig. 2.11에 나타내었다..

추진기는 선수부에 2개 후미부에 2개가 탑재되어있으며 UUV에 사용된 추진기의

선정은 USV 추진기 선정과 동일한 과정을 거쳐 선정했다. 상세 제원은 Table 2.3에 나타내었고 추진기의 모습은 Fig. 2.10과 같다.

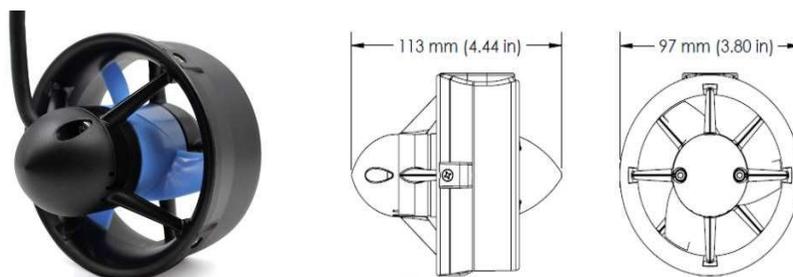


Fig. 2.10 Thruster of UUV

Table 2.3 Specifications of UUV thrusters

Full Throttle FWD/REV @ 16V	5.25 / 4.1 kg f
Operating voltage	7 - 20 V
Full Throttle Current @ 16V	24 A
Full Throttle Power @ 16V	390 W
Weight in Air	344 g

UUV의 무게를 분산하여 지지, 수중케이블의 보호, UUV 자세 안정을 위해 선수부의 수중 케이블 지지대 1개, 후미부의 지지대 2개 총 3개의 지지점과 연결된 금속 와이어는 한 점에서 묶여 수중케이블의 외피와 연결된다. 수중케이블과 UUV의 체결은 Fig. 2.11의 좌측에 나타내었다. 3개의 와이어의 길이를 조정함으로써 정지상태일 때의 선체의 기울어짐의 정도를 조정할 수 있다.



Fig. 2.11 Pictures of assembled UUV

UUV 내압용기 내부 모습은 Fig. 2.12에 나타나있다. 내압 용기 하단 내부 벽면에 5개의 전압 변환 모듈이 방열을 목적으로 알루미늄 방열판과 함께 항시 부착되는데 전압 변환 모듈의 세부 설명은 3장의 3.2.1에 나타내었고 그 형상은 Fig. 2.12 우측 상단에 나타내었다. 그 외 제어 부품들은 환봉(Round bar)과 제어 보드(Control board) 그리고 원형 지지대(Round support)로 이루어진 구조물(Fig. 2.12 에서 황색 점선)에 부착되어 동시에 탈착 가능하게 설계되었다.

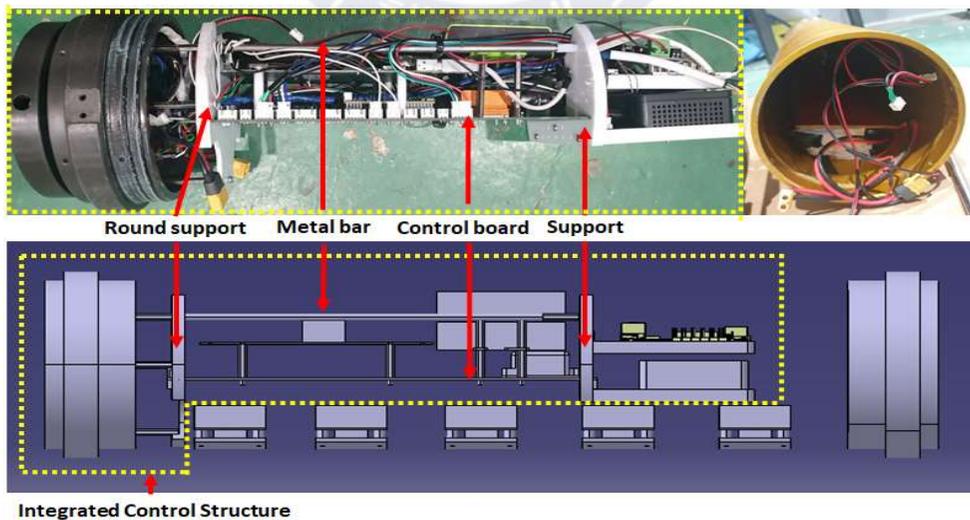


Fig. 2.12 Configuration of inner structure of cylinder

## 2.3 윈치시스템 구조

윈치시스템은 UUV의 수심제어를 담당하고 수상선 선체에 도킹과 언도킹을 가능케 한다. 윈치시스템은 수중케이블, 슬립링, 윈치, 레벨 와인더 샤프트, BLDC 모터로 구성되었다. 윈치 중앙의 회전축에 슬립링을 부착하고 도선들을 관통시켜 윈치가 회전하더라도 내부 배선이 꼬이지 않도록 배치하였으며 레벨 와인더 샤프트를 통해 윈치에 수중 케이블이 고르게 감기도록 하였다. 윈치시스템에 사용된 모터는 윈치 구조물과 케이블의 무게와 UUV의 무게를 더한 부하, 윈치직경과 안전율, 사용된 기어의 감속비와 기어의 효율을 고려해 선정하였다. 전자식 브레이크를 부착해 전류 부하를 가하지 않아도 윈치가 UUV의 하중을 견딜 수 있도록 설계되었다. 사용된 모터와 전자식 브레이크의 세부 사항은 부록 B에 나타내었다. 윈치의 외부 부품들과 조립된 모습은 Fig. 2.13에 나타나있다.

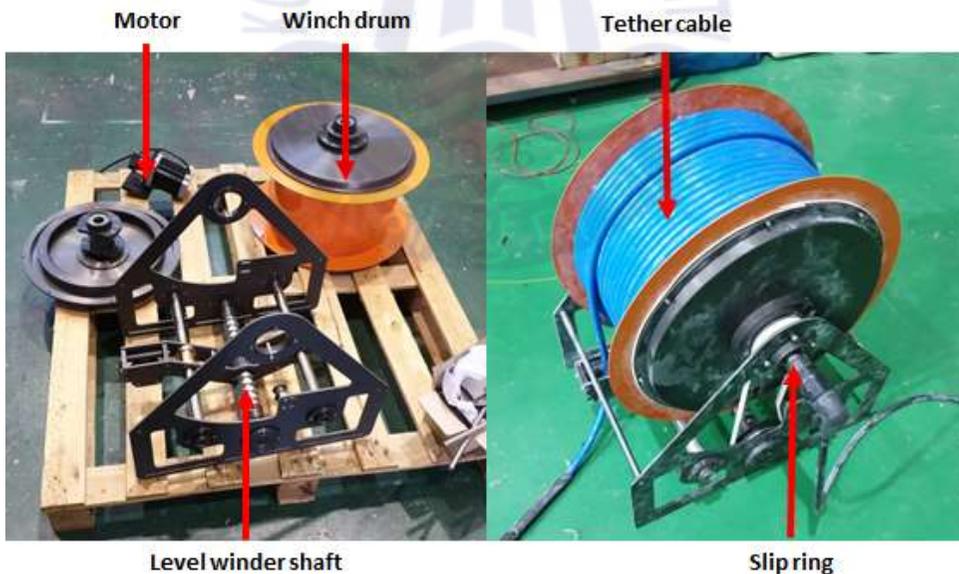


Fig. 2.13 Configuration of winch system

# 제 3 장 복합 플랫폼 구성 별 제어시스템 설계

## 3.1 무인수상정

### 3.1.1 무인수상정 전원부

USV의 전원 시스템의 개요도는 Fig. 3.1과 같다. USV의 선체는 방수 구조이지만 외부의 강한 충격, 운용자의 실수 상황에 의한 누수를 대비해 핵심 전원 부품들은 생활 방수 수준의 박스 내부에 보관되거나 자체 방수, 전원 단락 차단 기능을 가지고 있다.

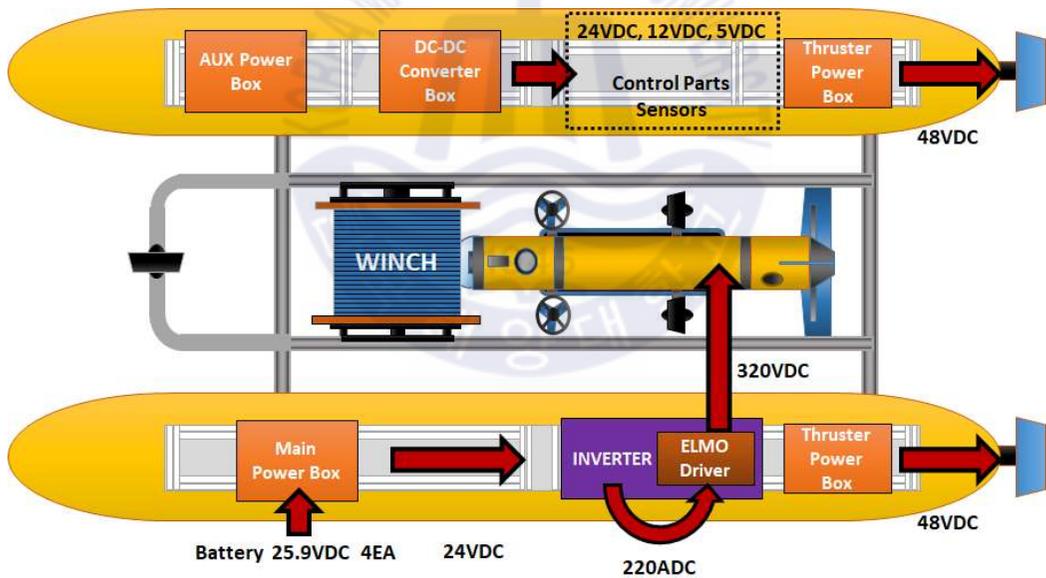


Fig. 3.1 Diagram of USV power system

전원으로 사용한 리튬이온배터리는 가볍고 에너지 밀도가 매우 커서 제한된 공간 내에서 전원을 공급해야 하는 USV에 적합하다. 하지만 폭발의 위험이 있으므로 배터리에 전량계를 부착해 실시간 전력량을 관측하고 안전장치가 내장된 상용 배터리

팩을 사용했다. 배터리 팩의 상세 제원은 부록 B에 나타내었다.

플랫폼의 총 가동 가능 시간 계산은 배터리 에너지양 산정 공식 식 (3.1)에 따라 계산되었다. 장기간의 원해 탐사용 플랫폼이 아닌 연안에서의 단기 임무를 목표로 한 플랫폼이라 부산지역의 7월 초 최대 일출/일몰 간 시간인 14시간 40분을 운용 목표 시간으로 선정하였다[7].

$$W_h = W_{Spend} \times L_f \times H \times O_p \div (B_a \times S_f) \quad (3.1)$$

여기서  $W_{Spend}$ 는 총 소모 전력량  $L_f$ 는 평균부하율  $H$ 는 한번 충전으로 사용하고자 하는 시간  $O_p$ 는 가동률  $B_a$ 는 배터리 총 용량 대비 사용 가능 용량  $S_f$ 는 안전계수이다. 총 소모 전력량은 센서를 제외한 추진기 용량의 합으로 선정했고 평균 부하율은 40%로 산정했다. 가동률은 40%로 계산하고 배터리 용량 대비 사용 가능 용량은 29V 충전기를 사용함으로 85%로 산정했으며 안전계수는 1.2로 계산했다. 이 계산식은 배터리 용량 선정에 참고하기 위한 어림 계산결과로 실제 운용 시간 실험은 5장 성능실험에 나타냈다.

선정된 4개의 배터리는 주 전원 박스(Main Power Box)에 연결된다. 이 박스에서 4개 배터리 중 사용하고자 하는 개수를 정할 수 있고 스위치를 통해 주 전원을 차단, 허용 할 수 있다. 실제 완성된 모습은 Fig 3.2와 같다.



Fig. 3.2 Main power box of USV

주 전원 박스에서 나온 전원은 추진기 전원 박스(Thruster Power Box)에 입력되어 48VDC로 승압 후 추진기에 공급되며 모습은 Fig. 3.3 과 같다. 핵심 부품인 DC-DC 컨버터는 CUI INC VFB 시리즈 600W급의 컨버터이며 효율은92%이다. 추진기가 최대 출력을 낼 경우 500W의 출력을 내게 되는데 승압 손실로 40W, 40J/s 의 에너지를 열에너지로 방출하게 된다. 그에 따라 19.2 CFM(Cubic Feet per Minute) DC 팬 2개를 서로 반대 방향으로 회전하게 설치해 방열했다. 또한 해초나 수면의 이물질에 의한 과전류의 위험에 대비해 PCB 기판에 과전류 차단 회로를 추가했으며 DC 컨버터 자체의 과전류, 고온, Surge 전압, 전원 단락 보호기능을 사용했다.

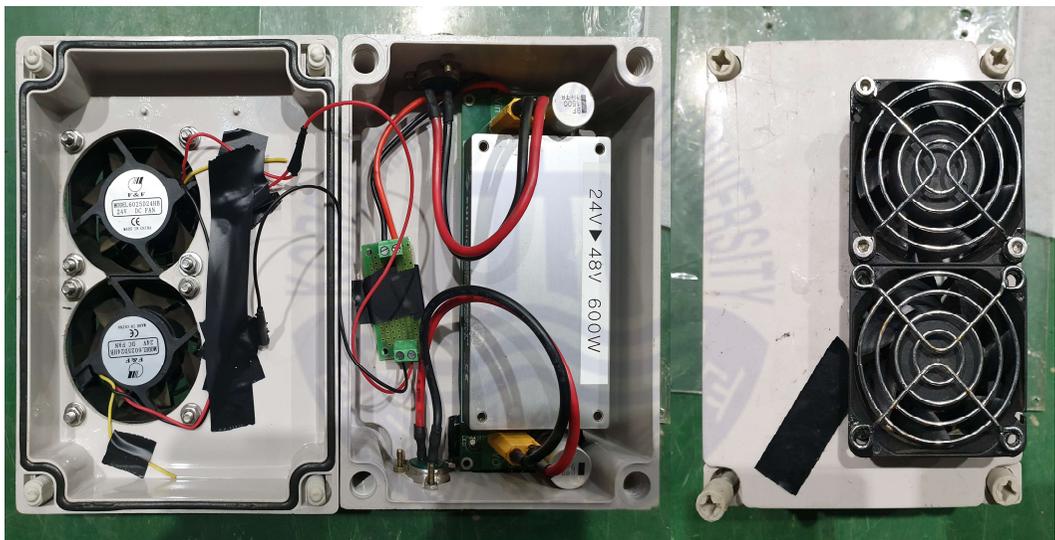
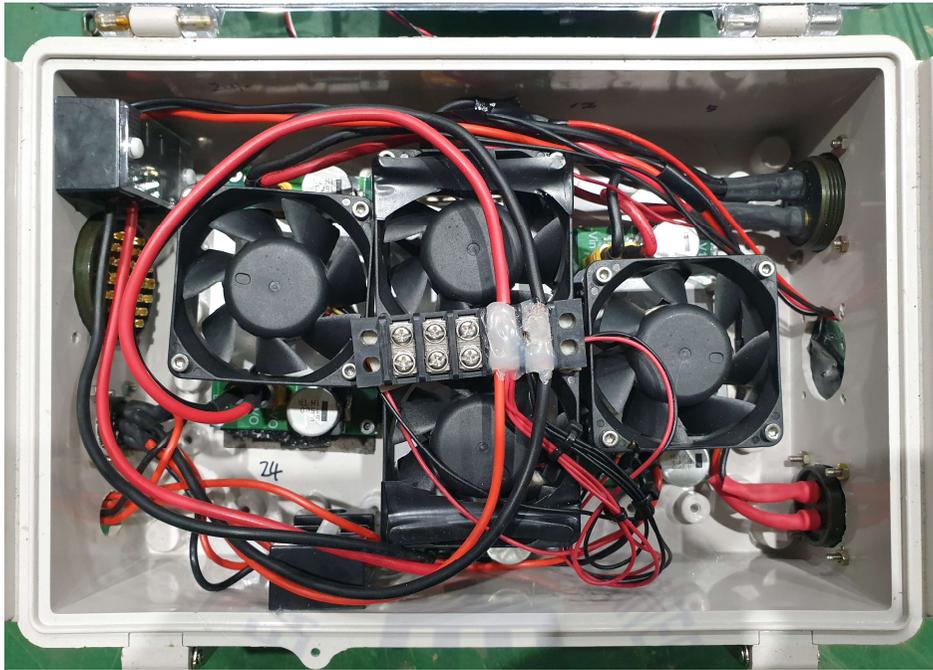


Fig. 3.3 Thruster power box of USV

우측 선체의 DC-DC 컨버터 박스는 제어에 필요한 컨트롤러와 선체에 부착된 센서들의 요구사항에 맞는 전압으로 감압하는 역할을 수행하며 24VDC, 12VDC, 5VDC 세 종류의 전압을 출력한다. 완성된 형태는 Fig. 3.4와 같으며 동일한 시리즈의 DC-DC 컨버터를 사용했으며 추진기 전원 박스의 DC-DC 컨버터와 마찬가지로 감압의 과정에서 발생하는 열을 방열하기 위해 DC 팬을 컨버터 상부, 박스 외부에 설치했다.



**Fig. 3.4** DC-DC converter box of USV

UUV에 송전하는 회로는 좌측 선체에 구성된다. 수중케이블 내에 전류가 흐르는 도체의 면적을 줄여 전체 수중케이블 두께를 줄이기 위해 배터리의 전원은 인버터를 통과해 220VAC로 변환되며 AC-DC 전원 공급 장치를 통해 280 ~ 320VDC로 승압된다. 인버터와 AC-DC 전원 공급 장치는 유사시 UUV의 전원 자체 차단하는 역할도 수행하며 사용된 인버터와 AC-DC 전압 공급 장치의 모습과 상세 제원은 부록 B에 나타내었다. Fig 3.5과 같고 제원은 Table 3.1, Table 3.2과 같다.

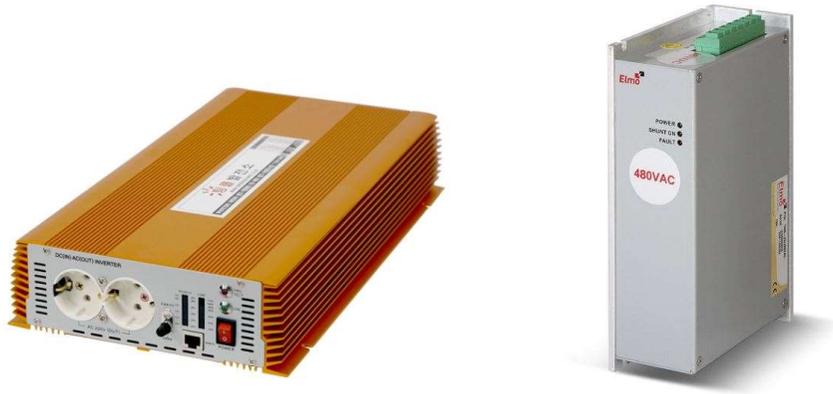


Fig. 3.5 DC-AC inverter and AC-DC power supply used in USV

Table 3.1 Specifications of DC-AC inverter

Size	L450 X W230 X H70 (mm)
Weight	6 (kg)
Output	220/230/240 VAC Nominal : 2700W, Max 3000W
Input	21 ~ 32 VDC
Additional functions	Over current protection, Overheat protection etc..

Table 3.2 Specifications of AC-DC power supply

Size	L182 X W115 X H55 (mm)
Weight	1.155 (kg)
Output	320 VDC Nominal : 7600W, Max 15200W
Input	230 VAC
Additional functions	EMC Filtering, Input current protection etc..

### 3.1.2 무인수상정 제어부

USV 내의 제어 구성품의 배치도는 Fig. 3.6과 같다. 배선 편의를 위해 우측 선체 내부에 윈치 제어기를 제외한 모든 부품들이 장착된다. 선수에 LIDAR 2개, 전방 카메라 1개가 부착되고 육상과의 통신에서 핵심 장비인 AP Bridge와 위치 정보 핵심 센서인 GPS는 후미의 높낮이를 조절할 수 있는 별도의 구조물을 이용해 장착했다. UUV의 상대 위치를 측정하는 센서인 USBL은 선수쪽 선체 연결 프레임에 부착된다. 육상에서 UUV의 도킹 상태 확인에 사용되는 도킹 카메라는 후미쪽 선체 연결 프레임에 연결된다. 추진기는 총 3개가 부착된다. 선체 길이방향 추진용 주 추진기 2개가 선체 후미에 부착되며 선수쪽 선체 연결 프레임에 소형 추진기가 부착된다.

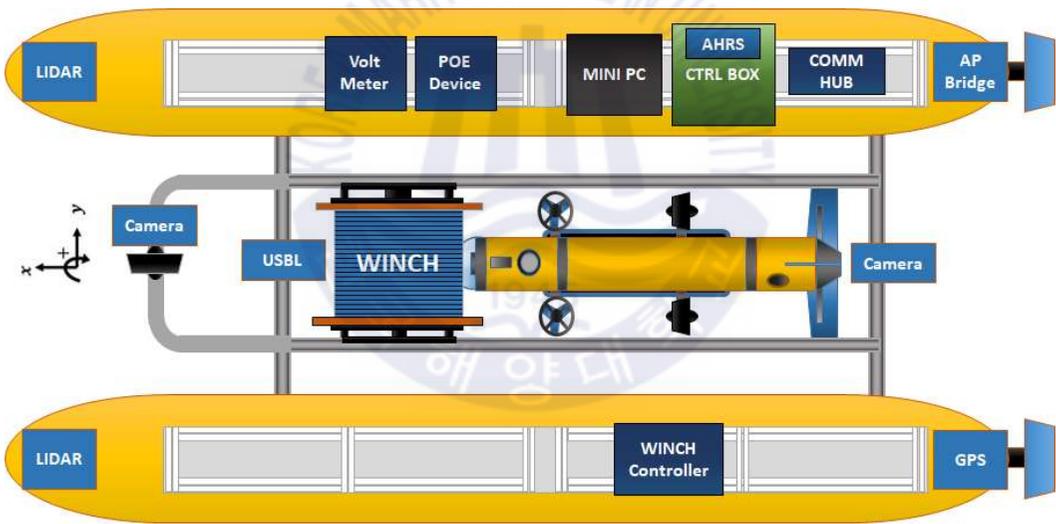


Fig. 3.6 Diagram of USV control components

Fig. 3.6의 우측 선체의 제어 박스(Control Box)는 USV의 제어 시스템의 핵심으로 센서 데이터 정리, 육상과 통신을 담당, USV를 제어, UUV 제어 명령 전송을 담당하는 마이크로프로세서 2개와 윈치 제어를 담당하는 프로세서 1개로 통 3개의 MCU가 부착되어있다. 제어 박스 내부 구성품들의 배치와 배선은 Fig. 3.7에 나타내었다.

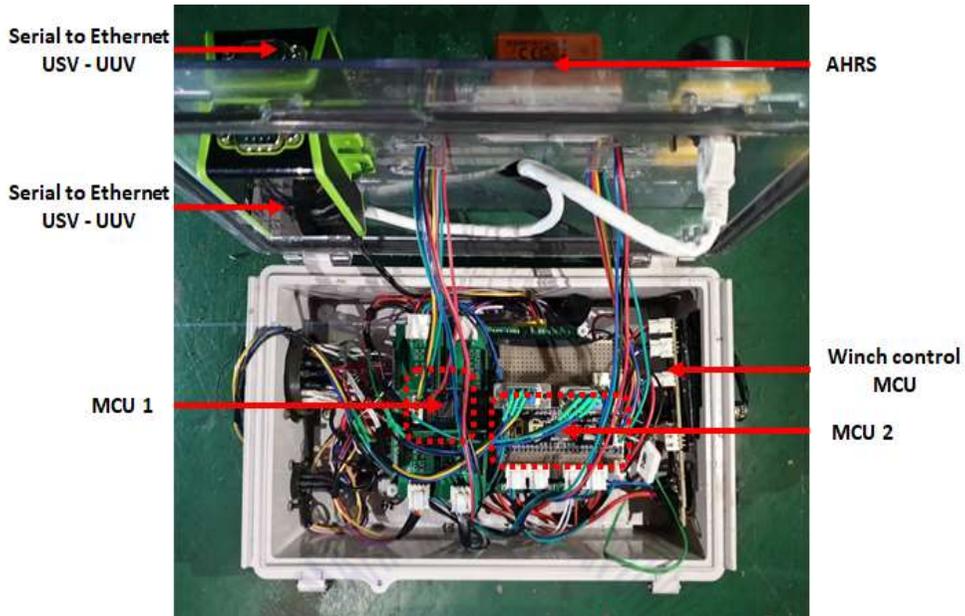


Fig. 3.7 Control box of USV

USV의 제어 시스템은 2개의 MCU와 1개의 MINI PC를 중심으로 구성된다. MCU1(Micro Processing Unit 1, M1)은 항법센서들의 데이터를 수신하고 후처리 하며 그 결과를 MCU2(Micro Processing Unit 2, M2)로 전송한다. AP Bridge를 통해 육상 운용콘솔에서 들어온 제어 명령들은 통신 허브를 거쳐 M2에 입력된다. M1에서 받은 정리된 센서 데이터를 이용해 육상 운용콘솔에서 수신된 제어 명령들을 수행한다. 2개의 MCU와 1개의 MINI PC를 중심으로 주변 장비들과의 관계를 Fig. 3.8에 나타내었다.

M1과 M2는 Arm Cortex-M3 시리즈 기반의 CY8CKIT-059 보드를 사용했다. 이 프로세서는 Cypress社의 준FPGA(Field Programmable Gate Array) 논리 장치로 비교적 자유롭게 자체 논리 회로 구조를 바꿀 수 있다. 따라서 대부분의 입출력 포트를 통신, 아날로그, 디지털 등으로 자유롭게 바꿔서 쓸 수 있고 개발 보드의 크기가 작다는 장점 때문에 USV, UUV의 MCU로 선정되었다. MCU의 외관과 세부 사항은 Fig. 3.9과 Table 3.3에 나타내었다.

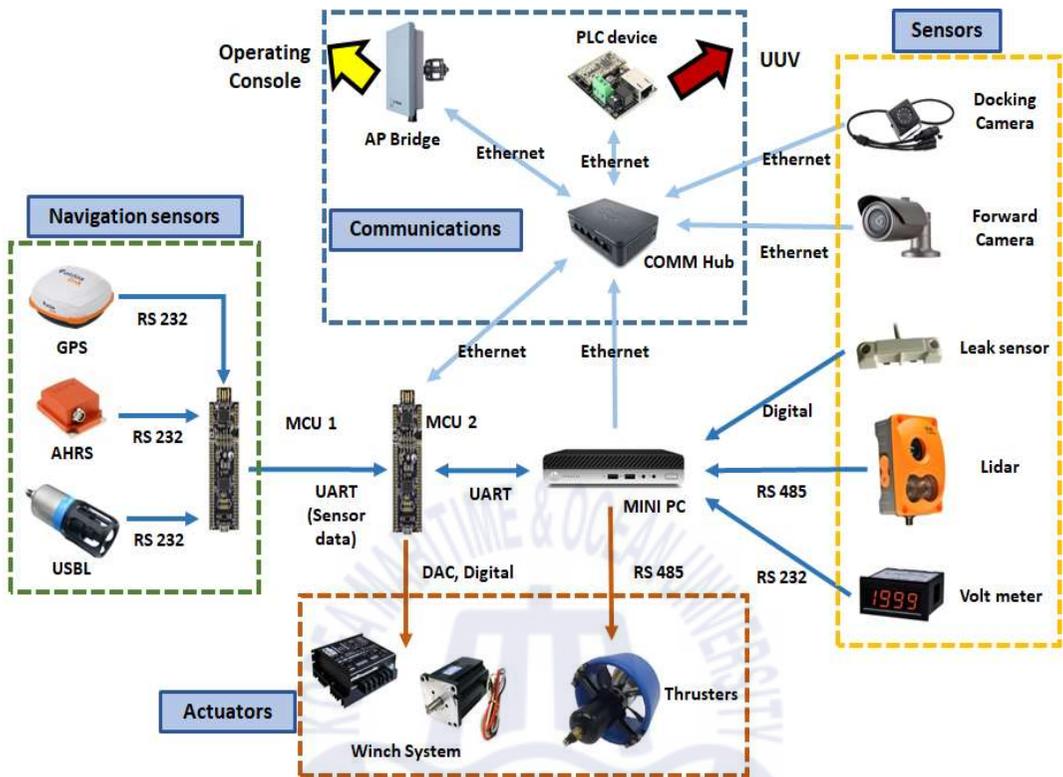


Fig. 3.8 Diagram of USV control system

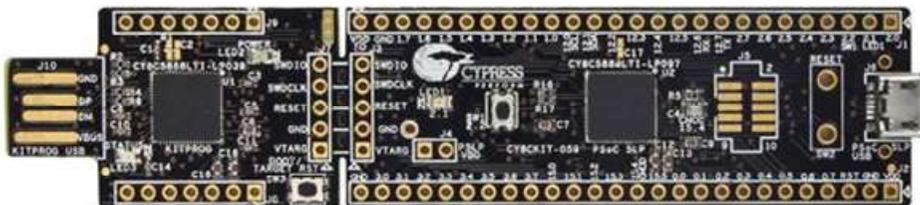


Fig. 3.9 CY8CKIT-059 board

**Table 3.3** Specifications of CY8CKIT-059 Board

Size	L110 x W24 x H2 (mm)
Input voltage	1.71 ~ 5.5 VDC
Maximum operation frequency	80 MHz
Flash memory	256 KB
SRAM	64 KB
CPU	CY8C5888LTI-LP097 (ARM Cortex-M3 structure)
EEPROM	2 KB

USV의 MINI PC는 M2가 연산한 추진기 출력값을 수신 받아 추진기를 구동하고 LIDAR 와 Volt meter의 전압값을 읽어서 육상 운용콘솔에서 확인할 수 있게 한다. MINI PC는 통신 허브 장비(Communication hub, COMM HUB)를 통해 운용콘솔과 TCP-IP 통신으로 연결되며 이를 이용해 육상에서 원격 접속 프로그램을 통해 센서 데이터들을 실시간 수신 할 수 있다. MINI PC는 플랫폼의 자세, 위치 등의 데이터의 실시간 저장의 역할도 수행하는데 OS에 텍스트 형태로 저장해 플랫폼 운용 중이나 운용 후에 언제든지 확인할 수 있게 하였다. 사용된 MINI PC의 제원은 부록 B에 나타내었다.

### 3.1.3 무인수상정 센서부

USV에 탑재된 항법 센서는 GPS, AHRS, USBL 이다.

GPS는 위치 측위, 항법, 타이밍(PNT) 서비스를 제공하는 미국 정부 소유의 위성 항법시스템이다. GPS는 3개 이상의 GPS위성에서 송신하는 위성의 위치, 상태, 시간을 포함하는 라디오파를 GPS 수신기가 수신해 삼각측량 방식으로 위치를 측정하고 그 외의 위성에서 수신한 신호로 오차를 수정하는 방식을 사용하여 위도, 경도, 고도 뿐 아니라 3차원의 속도 정보와 정확한 시간을 얻을 수 있다. GPS 장비에서 제공하는 데이터는 NMEA(The National Marine Electronics Association) 0183 규격에 맞춰져 있다. NMEA의 3가지 Layer 중 데이터 전송을 담당하는 Application Layer는

다양한 종류의 데이터 규격을 가지고 있는데, 그 중 복합 플랫폼은 GPRMC, GPGGA를 수신한다. M1은 두 가지 GPS 표준 프로토콜이 포함하는 데이터 중에서 위도, 경도, 고도, 방향각, 속도, 시간 데이터를 정리하여 M2로 전송하게 된다. 사용된 GPS는 Hemisphere社의 Atlas link GPS 이고 상세 제원은 Table 3.4에 나타내었다.

**Table 3.4** Specifications of GPS

Communications	NMEA 0183, UART		
Positioning Accuracy		Horizontal	Vertical
	SBAS	0.3m	0.6m
	DGPS	0.3m	0.6m
	RTK	10mm+1ppm	20mm+2ppm
Heading Accuracy	0.15° rms @ 1.0m antenna separation		
Input Voltage	3.3 VDC		
Power Consumption	< 2.1W nomial GPS		

AHRS(Attitude Heading Reference System)는 자이로스코프 및 참조 센서(지자기 센서, 가속도계)와 함께 3D Orientation을 계산하는 자세 방위 장치로 여기서 자세는 Roll, Pitch를 뜻하고 방위는 Heading(Yaw)를 나타낸다. 유사한 목적으로 사용되는 IMU(관성 측정 장치)와 가장 큰 차이점은 On-board processing 시스템의 유무이다. IMU가 고가의 정밀한 자이로스코프의 오차 안정성에 의존하여 센서 데이터를 반환하는 것에 반해 AHRS는 센서 융합 알고리즘으로 센서 데이터의 편향, 누적된 적분 오차를 중력, 지자기장으로 보상한다. 따라서 비용 대비 정밀한 자세, 방위 데이터를 취득할 수 있다. 신뢰도 높은 IMU는 MEMS(Micro Electronic Mechanical System) AHRS와 비교해 비용이 크고 무게가 많이 나가며 결정적으로 공간을 많이 차지한다. 따라서 소규모 응용 분야에 적용하기 어렵고 복합 플랫폼의 USV, UUV도 동일한 이유로 적용이 어렵다. 복합 플랫폼에선 Xsens社의 MTi-30 시리즈 제품을 선정했으며 제원은 Table 3.5에 나타내었다. Mti-30은 자체 On-board processing의 설정을 필요에 따라 변화시키면서 사용할 수 있다.

**Table 3.5** Specifications of MTI-30 AHRS

Orientation	Roll / Pitch	0.5° ~ 2.0° (Dynamic)
	Yaw	1.0°
Gyroscope specification	Initial bias error	0.2 deg/s
	g-sensitivity	0.006 deg/s
Accelerometer	Initial bias error	0.05 $m/s^2$
Magnetometer	Total RMS noise	0.5 mGauss
Power consumption	550 mW @ 5.1V	
Operating voltage	4.5 ~ 34V	

USBL은 HPR(Hydro acoustic Position Reference) 장비 중 하나로 음파를 사용해 수중 위치 측위를 수행한다. USBL은 트랜스듀서 사이를 연결한 기선(Base Line)으로 부터 음파의 위상차 또는 위상 비교로 음원의 방향을 계산하는데 음파는 원뿔 모양으로 전파되므로 최소 3개 이상의 트랜스듀서를 배치해 3D Orientation에서의 음원의 방향을 계산한다. 방향을 이용해 음원을 기준으로 X, Y 좌표를 생성하고, X, Y 좌표를 통해 Z 좌표를 연산하여 거리 정보를 계산한다. USBL은 선박에 부착되는 Transceiver와 바닥이나 수중 운동체에 부착하는 Transponder(Responder)와 Transceiver에서 측정된 거리와 방향각을 연산하는 컴퓨터로 이루어진다. 복합 플랫폼에서 사용한 USBL 시스템 Blueprint Subsea社의 Seatrac시리즈는 Transceiver에 연산용 프로세서가 내장되어 있어 별도의 컴퓨터 없이 거리와 방향각을 반환하고, 크기가 작고 가벼워 복합 플랫폼에 사용하기 적합하다. 사용된 USBL의 상세 제원은 Table 3.6와 같다.

**Table 3.6** Specifications of SeaTrac USBL

Acoustic Range	1km radius horizontal, 1km vertical
Velocity-of-Sound Range	1300ms <sup>-1</sup> to 1700ms <sup>-1</sup>
Power Consumption	Less than 10W
Supply Voltage	9V to 28V DC
Range Resolution	±50mm
Angular Resolution	±1°

GPS, AHRS, USBL의 사진과 항법용 센서 외에 USV에 사용된 센서는 부록 B에 나타내었다.

## 3.2 무인잠수정

### 3.2.1 무인잠수정 전원부

UUV는 테더케이블을 통해 320VDC를 공급받는다. UUV의 전원 계통은 수중케이블을 통해 입력된 후 320VDC를 15VDC로 감압해 추진기에 공급하는 계통, 320VDC를 12VDC로 감압해 제어 보드와 센서에 공급하는 계통 두 종류로 나누어진다. 간략화 된 전원 계통도는 Fig. 3.10과 같다. 320VDC를 감압하는 보드의 주요 부품인 DC-DC 컨버터의 제원은 Table. 3.7과 같다. 추진기의 최대 소모 전력이 350W 인 것을 감안하여 500W 급 컨버터를 사용했으며 단락, 과전류의 경우를 대비한 보호 회로와 큰 폭으로 변화하는 추진기의 소모 전력에 대응하기 위해 노이즈 제거 회로, 출력보조 필터 등을 부착했으며 설계한 회로와 PCB 정보는 부록 B 에 표시되어 있다.

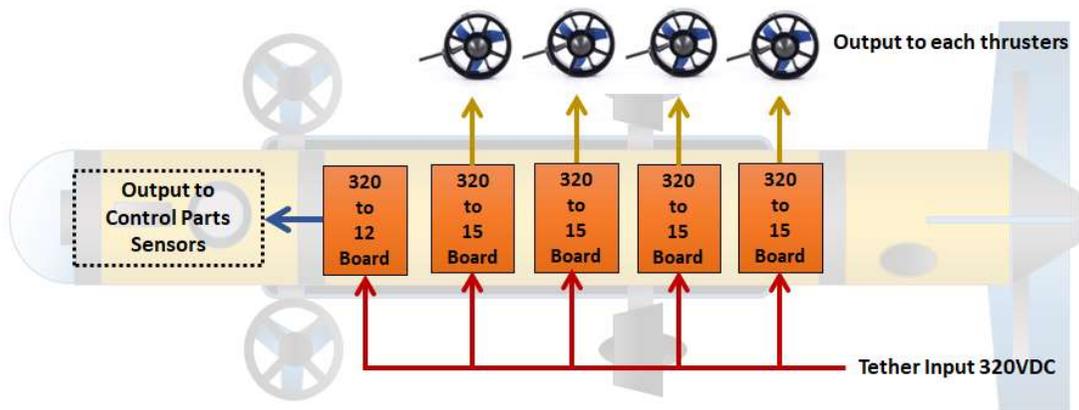


Fig. 3.10 Diagram of UUV power system

Table 3.7 Specifications of UUV DC-DC converter

Size	L185 x W115 x H55 (mm)
Input voltage	160 ~ 420 VDC
Output	0 ~ 21 VDC nominal output : 500W
Efficiency	Maximum 93.1%
Operation temperature	-40 ° C ~ 125 ° C
Additional functions	Current protection, Surge protection etc..

완성된 전원 변환 보드에 무 부하로 70% 출력을 내는 경우 평균 70°C 까지 표면 온도가 상승함을 확인하였는데 폐쇄된 내압용기에서 장기적으로 전원 변환 보드 자체의 소자들과 컨트롤러나 센서에 영향을 줄 수 있는 온도이고 실제 해수에서 구동하여 부하가 발생하면 온도가 더 상승할 가능성이 있다. 이에 선체 외벽의 곡률과 일치하는 알루미늄 방열판을 설계하고 제작했으며 DC-DC 컨버터와 알루미늄 방열판 사이에는 서멀 그리스(Thermal grease)를 도포했고 방열판과 선체 외부 벽면은

서멀 접착제(Thermal adhesive)를 사용해 부착했다. 알루미늄 방열판의 외관과 전원 변환 보드의 모습은 Fig. 3.11과 같다.



**Fig. 3.11** Aluminum heat sink and power converter board in UUV

5개의 전원 변환 보드는 일렬로 나열된 형태로 내압용기 벽면에 부착되었으며 입력 전압이 고압인 것을 감안해 입력 전선은 가늘고 부드러운 실리콘 도선을 사용하여 5개의 보드에 병렬로 입력했고 출력은 저전압 고전류임을 감안하여 최대 전류량에 맞춰 내부 배선을 진행했다. 일렬로 배선된 형태는 Fig. 3.12의 우측에 나타냈고 벽면에 부착된 형태는 Fig. 3.12 좌측에 나타냈다.

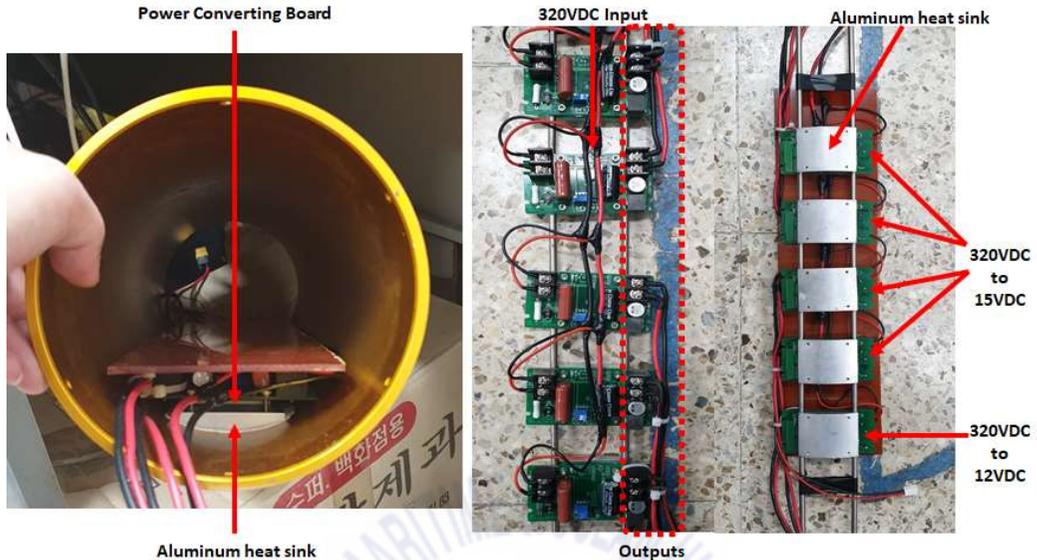


Fig. 3.12 Assembled power board of UUV

### 3.2.2 무인잠수정 제어부

UUV 내의 제어 구성품의 배치도는 Fig. 3.13와 같다. 배치도에서 Rear side로 표시되어 있는 내압용기 후미부 커넥터를 통해 수중케이블의 도선들이 내압용기 내부로 들어온다. 수중케이블 전원 도선은 하부의 전원 보드에 병렬로 입력되고 통신 도선은 MINI PC 위에 배치된 PLC 통신 장비를 거쳐 통신 허브로 입력된다. 내압용기 중심을 가로지르는 제어 보드를 중심으로 수심 측정 센서, AHRS, Serial - Ethernet 장비들이 배치되고 제어보드와 SSS 연산 보드는 적층된 형태로 고정된다.

USV의 제어 보드에는 각 MCU와 센서들의 요구 전압으로 감압하고, 안정화시키는 전원부 회로가 탑재되어 있고 M1, M2를 탈 부착할 수 있는 핀과 카메라 조명 제어 회로, 통신 제어 회로가 내장된다. Depth sensor의 데이터를 수신하여 UART 통신으로 변환하는 Arduino는 제어 보드와 통신 허브 사이 별도의 공간에 부착된다. UUV의 제어를 담당하는 제어 보드의 회로도 PCB 파일은 부록 B에 나타내었다. 제작된 제어 전장의 모습은 Fig. 3.14에 나타내었다.

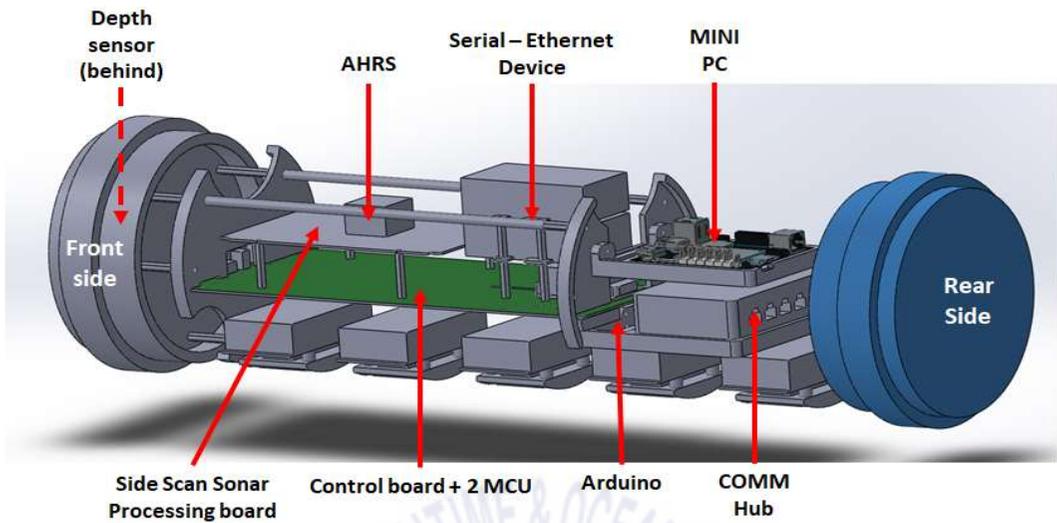


Fig. 3.13 3D Layout of UUV control system

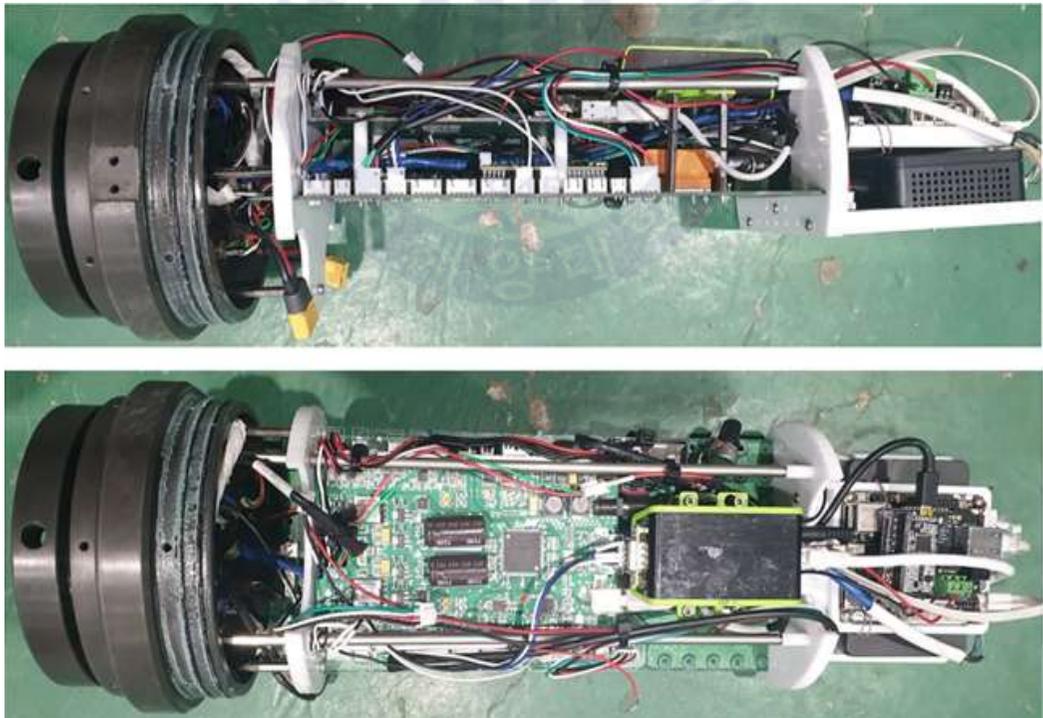


Fig. 3.14 Configuration of assembled UUV control system

UUV의 제어 시스템은 2개의 MCU와 1개의 MINI PC를 중심으로 구성된다. MCU1(M1)은 AHRS, 수심 측정 센서의 데이터를 수신하고 후처리 하며 그 결과를 MCU2(M2)로 전송한다. 2개의 MCU와 1개의 MINI PC를 중심으로 주변 장비들과의 관계를 Fig. 3.15에 나타내었다.

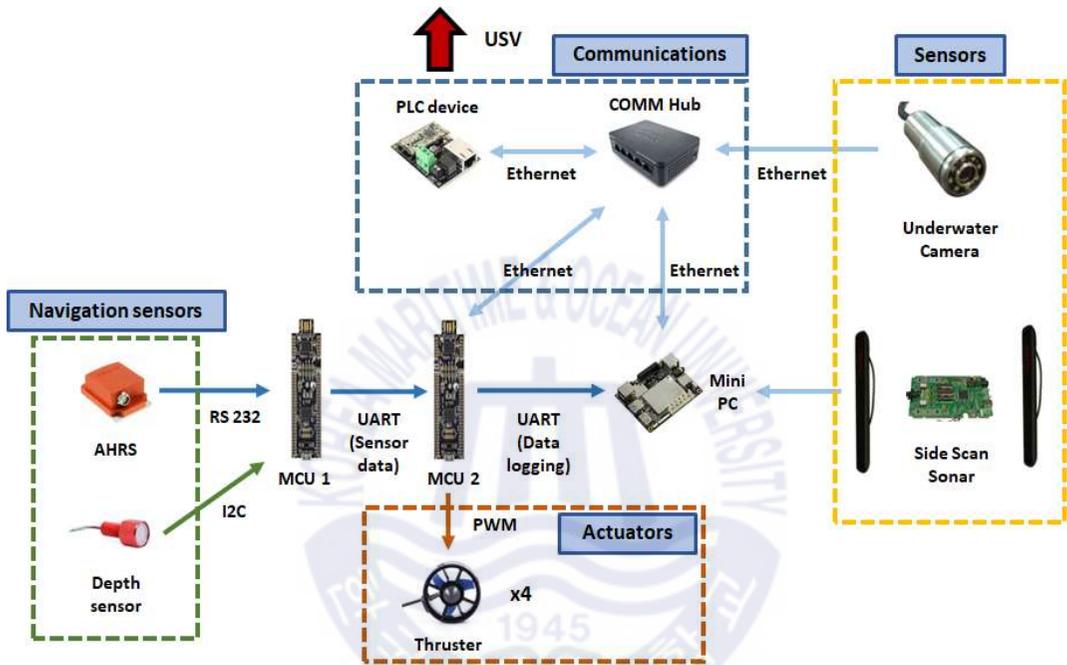


Fig. 3.15 Diagram of UUV control system

USV에서 송신한 제어 명령은 PLC 장비, 통신 허브를 거쳐 M2에 수신되며 M2는 M1의 센서 데이터를 바탕으로 제어를 수행한다. 상대 제어, 추종 제어 등의 명령을 수행하기 위해 USV에서 제어 명령과 함께 USV의 데이터도 같이 송신된다. 제어 명령과 USV의 데이터는 통신 패킷 형태로 전송되며 패킷에는 목표 Heading각, 목표 자세값, 목표 제어 반경 등의 구체적인 제어 명령과 USV의 Heading각, USBL 데이터, USV의 자세값 등 UUV의 USV에 대한 상대제어에 사용될 센서 데이터 들이 포함된다. M2에 연산 결과에 따른 추진기 추력은 PWM 신호로 변환되어 4개의 추진기의 모터드라이버로 전송되고 추진기를 추진한다.

### 3.2.3 무인잠수정 센서부

UUV에 탑재된 주요 센서는 AHRS, 수심 측정 센서, 측면주사음향측심기이다.

UUV에 사용된 AHRS는 USV와 동일한 장비를 사용한다. USV와 달리 UUV는 GPS의 신호를 받을 수 없으므로 MTI-30이 송신하는 자세각 정보, Heading 정보가 중요한 역할을 담당한다. 또한 UUV가 별도로 움직이는 경우를 제외하고 USV와 UUV의 방향각은 같은 방향을 바라보도록 제어하는 것이 목적인 본 시스템에서 UUV의 AHRS에서 수신된 Heading 데이터와 USV의 AHRS와 GPS에 의해 얻어진 Heading 데이터가 일치하는 정도는 제어성의 중요한 척도로 적용한다. 이 부분은 5장에서 다시 언급된다.

UUV의 수심 측정 센서는 수심 계측 장비로써 잠수하는 동안 수압에 노출되는 해양 잠수 플랫폼의 가장 중요한 센서 중 하나로 압력을 전기신호로 변환하는 통상적인 압력 센서의 일종이다. 수압 계측 외에도 SSS 데이터의 지정학적 오차를 보상하는 역할로도 사용된다. 복합 시스템에 수심 측정 센서 외에 SSS의 연산된 측정값, USBL의 상대 수심 측정값 총 3 종류의 수심 계측 데이터를 가지나, 그 중 제조사에서 공개한 분해능이 가장 우수하고 데이터에 연산의 개입이 적은 수심 측정 센서의 데이터를 가장 신뢰한다. 사용된 수심 측정 센서는 BlueRobotics社의 Bar100 Depth/Pressure sensor이며 세부 사항은 Table 3.8에 나타내었다.

**Table 3.8** Specifications of Depth sensor

Supply Voltage	2.5 ~ 5.5 V
I2C Logic Voltage	1.8 ~ 3.6 V
Peak Current	1.5 mA
Operating Pressure	0 - 100 bar
Absolute Accuracy(0 - 50°C)	+/- 500 mbar (5.1m in freshwater)
Resolution	3 mbar (3cm in freshwater)

측면주사음향측심기(SSS)는 측면주사소나 라고도 불리며 음파를 해저 바닥면을 향

해 좌우로 비스듬히 향하도록 송신하고 수신된 반사음파를 통해 해저면이나 물체의 형태를 음향학적으로 영상화하는 장비이다. UUV의 좌현과 우현에 Transducer가 하나씩 부착되어 있으며 내압용기 내부 SSS 처리 보드에 연결되어 있다. 영상화된 SSS의 데이터는 UUV의 MINI PC로 전송되며 육상에서 UUV MINI PC IP 주소에 원격 접속 및 제어를 수행하여 영상정보를 확인할 수 있다. 사용된 SSS는 Bluerint Subsea社의 StarFish 453 모델이며 상세 사항은 Table 3.9에 나타내었다.

**Table 3.9** Specifications of StarFish 453 side scan sonar

Supply Voltage	9 ~ 28 V DC	
Power Consumption	Idle 2.5W @ 12V	5W @ 12V
Beam width	60 ° (Vertical)	0.5 ° (Horizontal)
Operating range	1m ~ 100m per channel	
Operating mode	CHRIP pulse compression	
Weight	0.35 kg(Transducer)	0.1kg(Board)

그 외 UUV에 사용된 센서의 외관과 세부 사항들은 부록 B에 나타내었다.

### 3.3 원치시스템 제어부

육상 운용콘솔에서 송신된 원치 제어 명령은 USV의 M2가 수신한 후 원치 제어 보드에 회전방향, 회전속도, 브레이크 사용 유무를 패킷형태로 전송한다. 원치 제어 보드는 좌측 선체에 배치된 원치 모터 드라이버에 회전 방향, 브레이크 제어용 디지털 신호와 회전속도를 제어할 아날로그 신호를 전송한다. 모터에 가해지는 부하가 크므로 기동 토크로 인한 전력의 오버슈트를 대비해 모터의 정격 출력인 300W를 2배 이상 제어 가능하면서 급격한 전류 변화에 전원을 차단시키는 모터 드라이버를 선정했고 사용한 모터드라이버의 외관과 상세 사항은 부록 B에 나타내었다.

### 3.4 운용 시스템

#### 3.4.1 운용 콘솔

복합 플랫폼에서 사용하는 육상 운용 콘솔의 하드웨어는 생활방수 기능, 바퀴와 손잡이, 내충격성을 가진 캐리어형 박스 내부에 상용 PC의 부품과 통신 안테나에 전원을 공급할 SMPS를 별도로 부착해 제작되었다. 소프트웨어는 윈도우 OS를 기반으로 운용 GUI 프로그램, 원격 접속 프로그램 등을 사용한다. 원격 제어용 무선 컨트롤러, 마우스, 키보드 무선 랜 카드가 사용자 편의를 위해 내부에 수납된다. 제작된 운용 콘솔의 내부, 외부의 모습은 Fig. 3.16와 같다.



Fig. 3.16 Operating console for integrated platform

### 3.4.1 운용 GUI 프로그램

복합 플랫폼에서 운용 프로그램은 USV와 UUV의 각종 데이터를 수신하고 구체적인 제어 명령을 플랫폼에 전달하는 목적을 가지고 있다. 운용 프로그램은 C# 프로그래밍 툴을 기반으로 만들어진 프로그램으로 화면에 표시되는 구성들과 설명을 Fig. 3.17에 나타내었다.

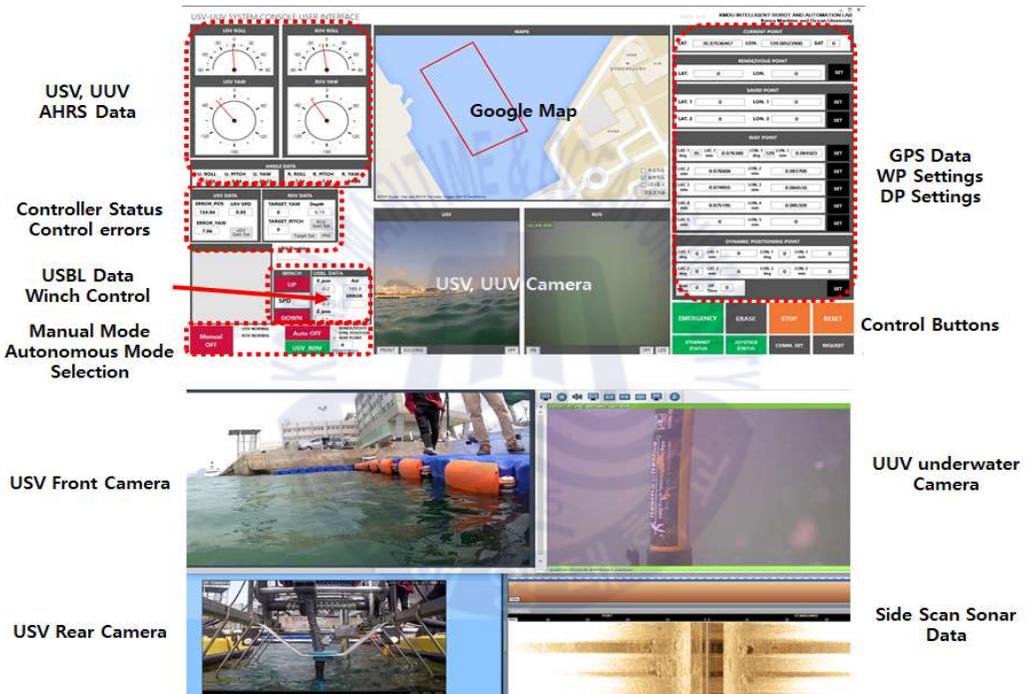


Fig. 3.17 Operation GUI program for integrated system

상단의 화면이 운용 프로그램의 인터페이스 화면이고 하단의 화면이 별도의 디스플레이를 연결했을 때 나타나는 실시간 영상, SSS 데이터 영상 표시 화면이다. 운용 프로그램엔 항법 센서들의 데이터가 모두 표기되며 구글맵과 연동해 현재 플랫폼의 위치를 확인하는 기능, 입력된 경유점을 따라 경로를 그리는 기능, 탑재된 제어기의 제어기 이득을 입력하는 기능, 제어 입력이나 제어 오차 등을 표시하는 기능 등을 탑재했다.

## 4장. 복합 플랫폼 통합 제어 시스템

복합 플랫폼 전체의 제어시스템 구성은 Fig. 4.1과 같다.

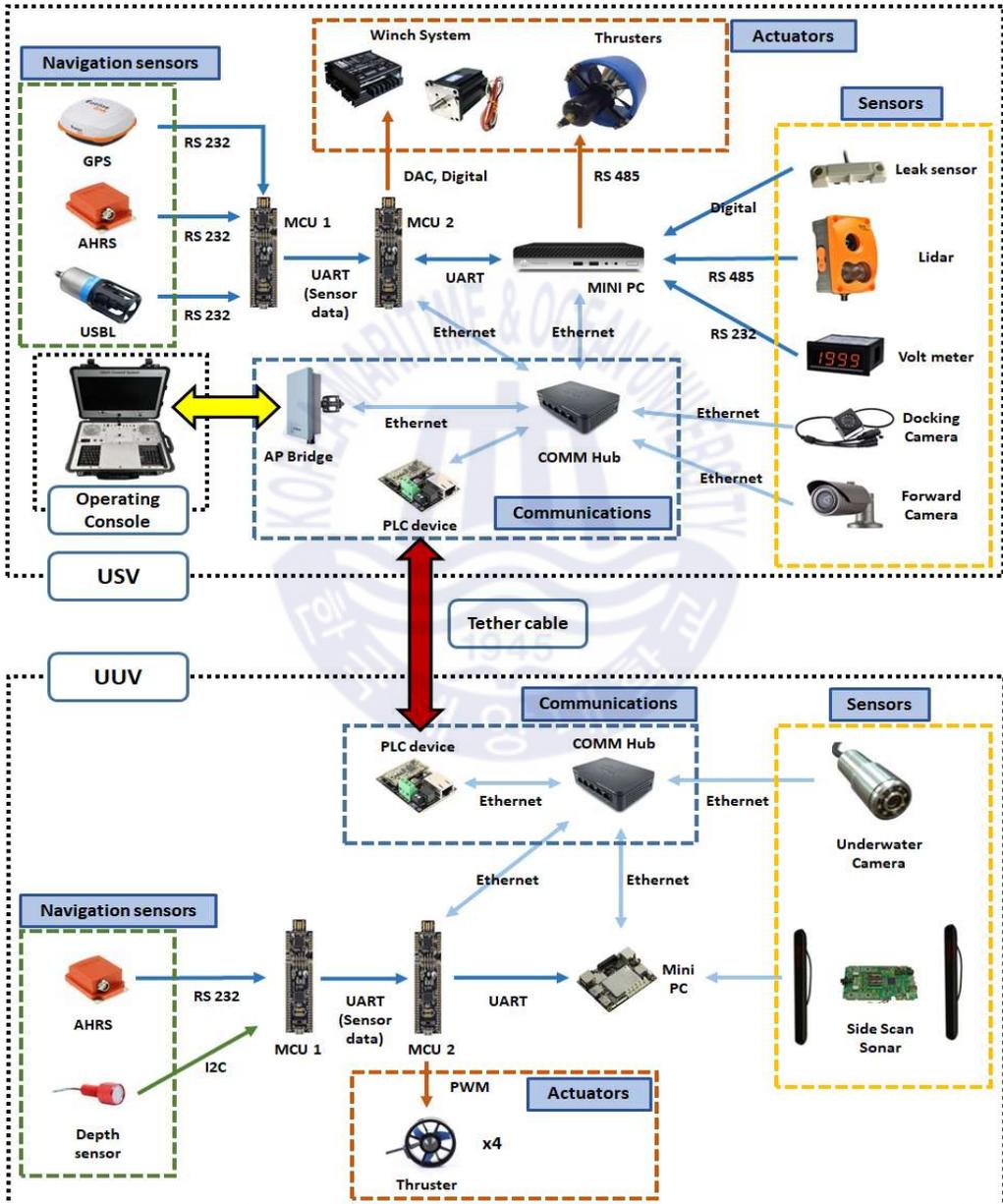


Fig. 4.1 Diagram of integrated platform control system

Fig 4.1의 우측에 나타낸 일반 센서의 경우 제조사별 규격이나 상용 프로그램으로 데이터를 수신하며 MCU를 중심으로 한 항법이나 추진 제어에 활용되지 않고 통신 허브를 거쳐 운용 콘솔로 전송된다. 영상, 소나 데이터, 전압 정보 등이 이 센서들의 데이터에 해당하는데 운용 콘솔에 나타내어 실시간으로 관찰하거나 운용 콘솔 자체에 저장한다.

#### 4.1 복합 플랫폼 통신 시스템

본 연구에서 복합 플랫폼의 통신 시스템을 도식화하면 Fig. 4.2과 같다. 모든 센서 데이터는 USV에 취합되어 운용콘솔로 전송되고, 운용 콘솔에서 송신한 제어 명령은 USV가 수신한 후 명령의 종류에 따라 USV의 MCU나 UUV의 MCU에 전송하여 제어한다. 플랫폼 간의 통신은 데이터양이 많은 소나 데이터나 영상 데이터를 다수 처리해야 하는 복합 플랫폼의 특성상 일반적인 직렬 통신에 비해 많은 데이터를 처리할 수 있는 TCP-IP 통신으로 구성된다.

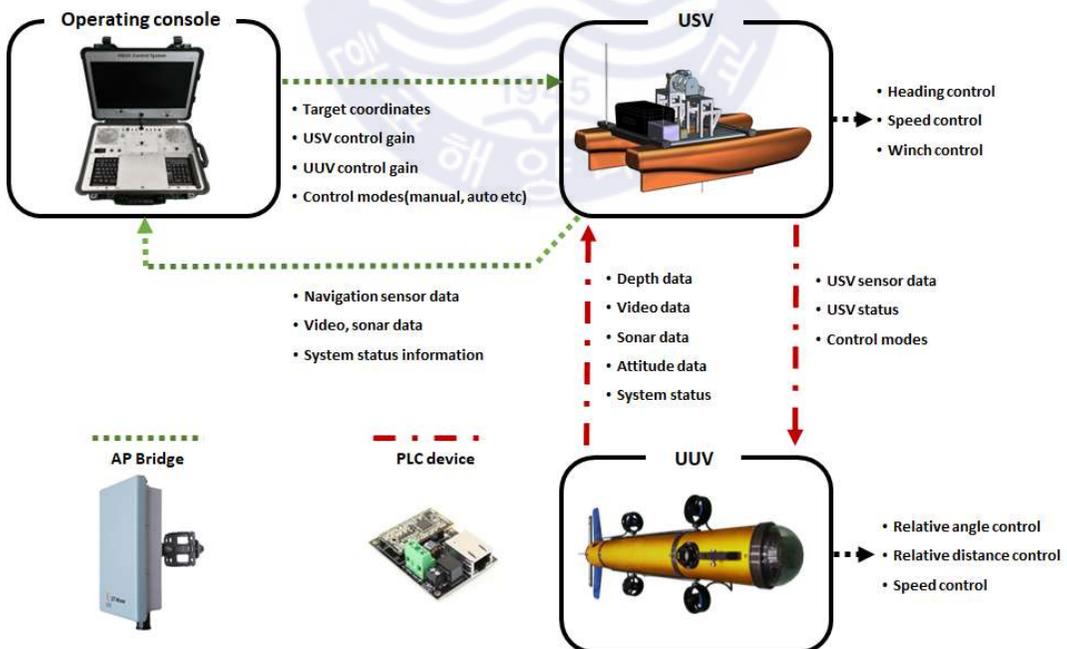


Fig. 4.2 Schematic diagram of communication system

#### 4.1.1 운용 콘솔 - USV 통신 시스템

운용콘솔과 USV간의 통신은 Fig. 4.3과 같이 도식화 할 수 있다.

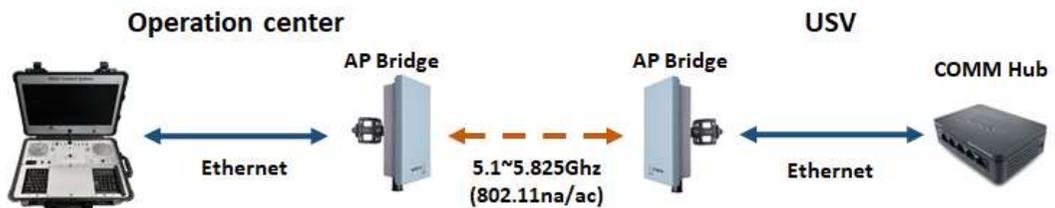


Fig. 4.3 Diagram of operation center - USV communication system

육상 운용콘솔에서 송신된 명령은 육상의 Access Point Bridge(AP Bridge) 송신부 안테나를 통해 전송되며 USV는 수신부 안테나를 이용해 명령을 수신하고 통신 허브(Communication Hub, COMM HUB)에 전송한다. 설치된 AP Bridge의 모습은 Fig. 4.4과 같다.

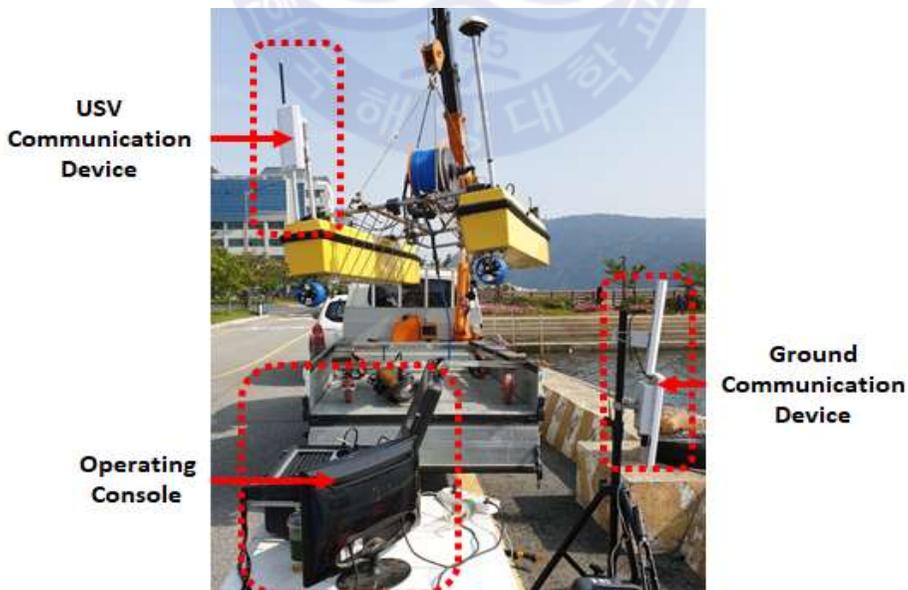


Fig. 4.4 Placement of AP Bridge

AP Bridge는 운용콘솔과 USV 간의 TCP-IP 통신을 수행하기 위해 유선랜과 무선랜 간의 연결을 수행시켜주는 AP(Access Point) 기능과 중계기 간의 중계를 위한 Bridge 역할을 하는 외부 장치의 기능이 조합된 장비를 나타낸다. 장비의 세부 사항은 Table 4.1에 나타내었다.

**Table 4.1** Specifications of AP Bridge communication device

Size	L165 x W289 x H89 (mm)
Weight	1.2 kg
Wireless protocol	IEEE802.11 a/b/g/n/ac MIMO-2T2R 2.4~2.485 GHz(802.11ng)/5.1~5.825 GHz(802.11na/ac)
Wireless speed	802.11ac: Max867Mbps (80MHz bandwidth) real Throughput: 360Mbps
Antenna	integral antenna - 2x2 MIMO antenna, Patch type, directional, 16dBi(5.15~5.825GHz) @ Able to install separate antennas to N female RF connectors
Power	65W External adapter

USV의 통신 허브는 USV와 UUV의 센서 데이터, 영상 데이터, 시스템 상태 등을 수신하여 운용콘솔로 송신하고, 운용 콘솔에서 수신된 제어 명령, 좌표, 제어 이득 등을 입력받아 마이크로프로세서나 MINI PC에 전송하는 역할을 수행한다. 사용된 통신 허브의 세부 사항은 Table 4.2에 나타내었다.

**Table 4.2** Specifications of communication hub

Size	L160 x W100 x H30 (mm)
Weight	0.43 Kg
Power supply	DC 12V 1.0A
Ports	RJ-45 for 10/100BASE-T
Ethernet	10/100Base-T, Auto MDIX ethernet port
Switching capacity	16Gbps
Forwarding capacity	11.9mpps(million packets per seconds)

USV는 육상 운용콘솔과 TCP-IP 방식으로 통신하지만 USV의 제어 연산을 수행하는 마이크로프로세서(Micro Processing Unit, MCU)에는 IP 주소가 할당되어 있지 않다. 따라서 Serial - Ethernet 통신 장비를 사용해 마이크로프로세서에 간접적으로 IP 주소를 할당하여 육상과 통신이 가능하게 한다. 본 연구에서 사용한 MCU는 Ethernet 프로토콜 직접해석이 불가능하므로 이 장비를 이용해 MCU가 해석 가능한 직렬 통신방식으로 변환하여 MCU에 송신한다. 통신 장비의 세부 사항은 Table 4.3, 외관은 Fig 4.5에 나타내었다.



Fig. 4.5 Serial - Ethernet device

Table 4.3 Specifications of Serial - Ethernet device

Size	L90 x W48 x H25 (mm)
Input coltage	12VDC (9 ~ 18V)
Serial communication	RS232
Serial communication speed	Maximum 115200bps
Ethernet	10/100Base-T, Auto MDIX ethernet port

## 4.1.2 USV - UUV 통신 시스템

USV와 UUV간의 통신은 Fig. 4.6와 같이 도식화 할 수 있다.



Fig. 4.6 Schematic diagram of USV-UUV communication

USV는 UUV에 GPS로 구한 USV의 위치 데이터, USBL을 이용한 USV - UUV 간의 상대거리 정보, AHRS를 통해 구한 USV의 방향각 등 USV의 센서 데이터와 운용 콘솔에서 수신한 제어 명령을 전송한다.

UUV는 USV에 운용 콘솔에 전송하기 위한 SSS 데이터와 수중 카메라 데이터 그리고 UUV의 AHRS를 통해 취득한 방향각, 자세각 데이터와 Depth sensor를 통해 구한 수심 데이터를 USV에 전송한다.

USV와 UUV 사이의 통신은 운용콘솔과 USV 사이의 통신과 동일한 TCP-IP 통신을 사용한다. 통상적인 유선랜 규격을 따르면 데이터 케이블 내부에 통신을 위한 케이블의 개수를 다수 할당해야 하는데, 도선의 개수가 증가하면 케이블의 직경이 늘어나게 되고 유체에서의 저항이 커져 제어에 어려움으로 작용하게 된다. 또한 통상적인 유선랜 규격에서 사용하는 신호의 세기가 작으므로 원치시스템에 사용된 수은 슬립링, 수중케이블, 수중 방수 커넥터를 통과하면 급격한 매질 변화와 도체 면적 변화에 인한 신호 감쇠로 신뢰성 있는 통신을 기대할 수 없다. 따라서 PLC(Power Line Communication)통신을 사용해 USV의 통신 허브와 UUV의 통신 허브 사이의 통신을 한다.

PLC 장비는 USV와 UUV 간의 송·수신되는 장비들의 최대 통신 속도를 감당할 수 있는 ROV 통신용으로 제작된 고성능의 PLC 장비를 선정해서 구성하였다. 선정

한 장비의 외관은 Fig. 4.7에 나타내었고 세부 사항은 Table 4.4와 같다.



Fig. 4.7 PLC device

Table 4.4 Specifications of PLC device

Size	L64.6 x W46.6 x H16.8 (mm)
Input voltage	7 ~ 28 VDC
Max power consumption	2.5 W
Max practical bandwidth	80Mbps
Physical layer bandwidth	200Mbps
Maximum communication range	2000m

#### 4.1.3 복합 플랫폼 내부 통신 프로토콜

운용콘솔 - USV, USV - UUV, MCU - MCU, MCU - MINI PC간의 센서 데이터, 제어 명령, 제어 이득은 하나의 통일된 패킷 형태로 전달된다. 본 연구에서 사용하는 통신 패킷의 규격은 Fig. 4.8과 같다.

\$	Start Packet	Command ID	Command Payload	End Packet	<CR> <LF>
1 char	2 char	2 char	Multiple chars	2 char	2 char

Fig. 4.8 Communication packet form of integrated platform

각 데이터 송, 수신 장비들은 Start Packet과 End Packet을 통해 데이터의 무결성(Integrity)을 검사하게 되고, 각 통신마다 다른 Command ID로 구분함으로써 처리과정에서 발생할 수 있는 데이터 패킷 간의 혼동을 방지했다. 실제 데이터 내용은 Command Payload 항에 포함되게 되며 어느 장비간의 통신인가에 따라 입력되는 내용과 길이가 다르다.

복합 플랫폼의 통신은 패킷에 대한 우선순위를 가지고 있으며 이를 통해 유사시 처리 과정에서 혼선이 발생하거나 데이터 간의 충돌이 발생하는 경우 오작동을 최소화하였다. 일례로 USV의 MCU2의 경우 운용콘솔에서 송신하는 데이터를 검사하고 수신하는 것을 최우선 순위로 지정해 운용자의 명령에 반응하는 것을 최우선 순위로 두고, MCU1의 경우 수신하는 센서 데이터 중 수신 주기가 가장 느린 USBL의 데이터 수신을 최우선 순위로 둔다.

## 4.2 무인수상정 경로 추종 및 동적 위치 제어

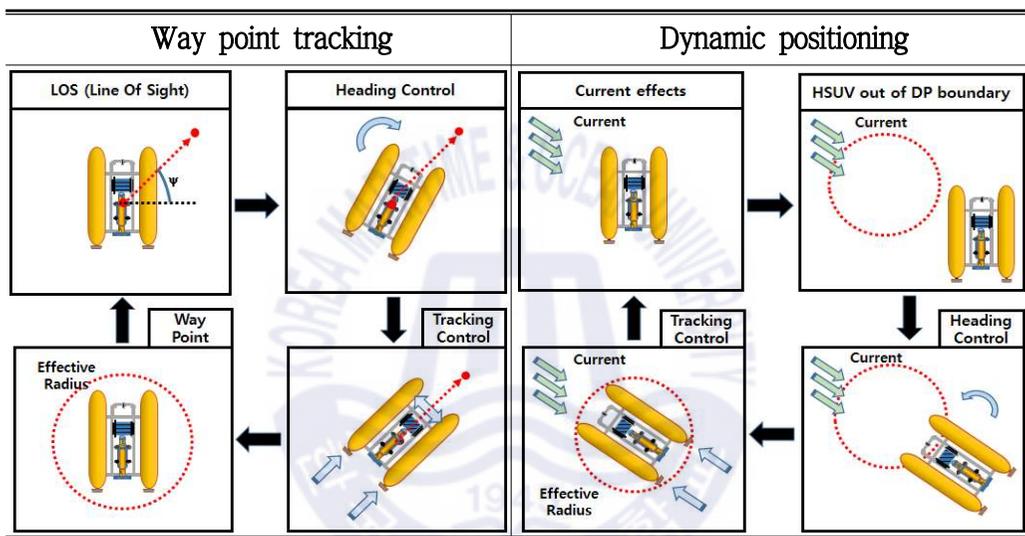
USV는 운용콘솔의 조이스틱을 이용한 수동 제어 기능과 자동 제어 기능으로 분류되고 자동 제어 기능은 경로 추종 제어와 동적 위치 제어로 구성된다.

경로 추종 제어(Way point tracking)는 운용 콘솔을 통해 입력한 좌표들을 USV가 순서대로 추종하는 제어 방식이고 동적 위치 제어(Dynamic positioning)는 운용 콘솔을 통해 입력한 임의의 좌표를 입력하면 바람이나 조류의 영향에도 그 위치를 유지하려는 제어 방식이다.

동적 위치 제어는 모두 Heading Control 과 Tracking Control 이라는 기능의 연속

으로 구현된다. Heading Control은 LOS(Line Of Sight)방법으로 목표 방향각을 목표 방향각과 USV의 선체 방향각(Heading)을 일치시키기 위해 제자리에서 선체를 회전시키는 기능이고, Tracking Control은 목표 지점을 향해 전진하면서 동시에 목표 방향각을 선체 방향각과 맞추면서 전진하는 과정이다[8]. Tracking Control과 Heading Control이 경로 추종 제어와 동적 위치 제어에 적용되는 방식은 Fig. 4.9에 나타내었다.

Fig. 4.9 Algorithm flow of way point tracking and dynamic positioning control



Tracking Control의 경우 직진주행과 선회를 동시에 고려해야 하므로 목표점과의 거리가 오차인 제어기와 목표점에 대한 방향각이 오차인 제어기 총 2가지 제어기로 구성된다. 이 제어기들은 PID를 기반으로 있는데, PID 제어기를 액추에이터의 출력에 적용할 때 일반적으로 I 제어기는 Anti-windup 처리를 한다[9]. I 제어기의 windup은 외란에 의해 이상적으로 제어 오차가 감소하지 않는 경우, 적분된 제어 명령이 액추에이터의 한계 추력을 초과해 계속 누적해 증가하는 것을 의미한다. 이 제어 명령이 제한 없이 증가하면 추후 제어 오차가 역방향으로 가해져 역 추진해야 하는 상황에도 이미 누적된 제어 명령이 제때 감소하지 않아 제어성에 큰 방해요인으로 작용하게 되며 불필요한 추진기의 움직임으로 에너지 소비가 증가한다.

따라서 Anti-windup 처리 후 I 제어기를 적용해야 하는데 Anti-windup 방식은 역

연산법, 트래킹 반와인드업 기법, 제한적분 기법 등 다양한 방법이 있다[10][11]. 본 연구에서 적용한 Anti-windup 블록 다이어그램은 Fig. 4.10과 같다.

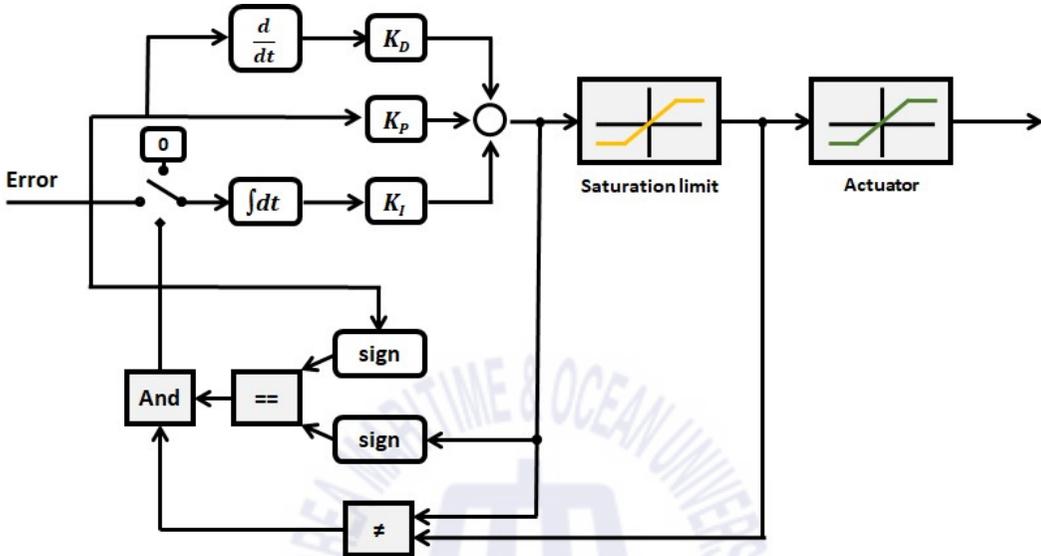


Fig. 4.10 Diagram for integral Anti-windup

포화 한계(Saturation limit)를 정하여 이 블록 전, 후의 출력을 비교해 제한이 가해진 유무를 확인하고, 오차와 제어기 출력의 부호를 비교한 후 적분기에 오차를 입력할지 0을 입력할지 결정한다. 이를 통해 제어기가 포화 상태이고 제어 오차가 제어기 출력과 부호가 같은 경우에 제한을 가하는 방식이다.

PID에 기반한 거리와 방향에 대한 두 제어기는 식 (4.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_i = K_{P_i} e_i + K_{I_i} \int e_i + K_{D_i} \dot{e} \quad (4.1)$$

$$i = \{Angle(\psi), Distance(d)\}$$

이 두 제어기의 각각의 출력에 가중치를 달리 부여하는 가중치 스케줄링(Weight Scheduling) 방식으로 후미의 2개의 주 추진기 출력을 조정한다. 가중치의 부여는 2개의 추진기로 직진과 선회 제어를 효과적으로 수행하기 위함이었으며 오차 거리와 오차 방향각의 정도와 선회나 직진 운동의 시작 단계와 종말 단계에 맞춰 각각 다

르게 부여되었으며 가해진 가중치는 경험적으로 구하였다. 가중치 스케줄링 방식은 식 (4.2)과 같이 정리하였다.

$$Input_{port} = sgn(R_{\theta})[T_{\psi}W] + sgn(R_{\theta})[T_d(1-W)] \quad (4.2)$$

$$Input_{stbd} = sgn(R_{\theta})[T_{\psi}W] + sgn(R_{\theta})[T_d(1-W)]$$

식에서  $sgn(R_{\theta})$ 는 목표 방향각과 플랫폼 간의 상대 각도에 따른 부호 결정으로 이 방식은 방향각 센서(AHRS)의 출력이  $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 로 나타남을 이용하여 경우에 따라 좌, 우 추진기의 추력 방향을 결정한 결과이다. 목표 방향각이  $0 \sim 180^{\circ}$  내에 포함되는지 아니면  $0 \sim -180^{\circ}$  내에 포함되는지에 따라 다르게 연산 되는데  $0 \sim 180^{\circ}$  내에 존재 하는 경우를 예를 들어 도식화 하여 설명하면 Fig. 4.11과 같다.

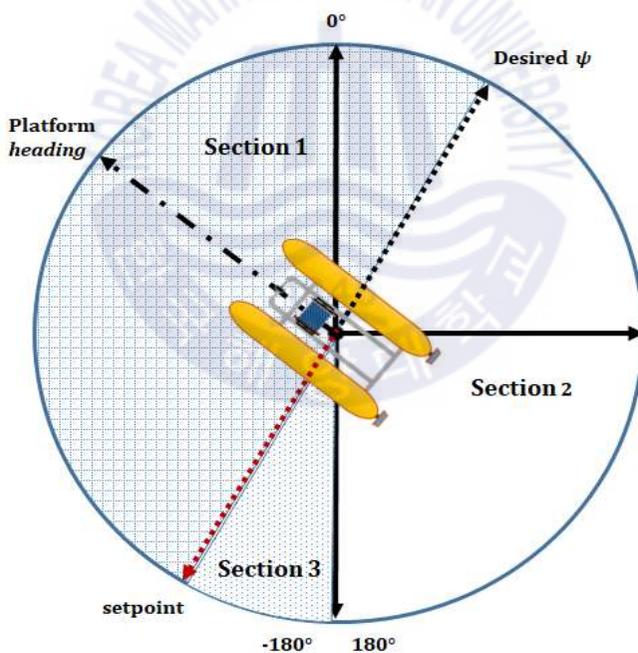


Fig. 4.11 Method for sign decision

여기서 Desired  $\psi$ 는 플랫폼의 목표 방향각을 나타내고 Platform heading은 플랫폼의 방향각 센서에서 수신된  $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$  사이의 값을 나타낸다. 목표 방향각 값에서  $180^{\circ}$ 을 빼면 가상의 연장선인 setpoint를 설정할 수 있고 Desired  $\psi$ , setpoint

그리고 Fig. 4.11 하단의  $-180$ 과  $180$ 의 불연속 구간을 기준으로 연속적인 데이터 변화를 가지는 3개의 구간을 나눌 수 있다. 나누어진 구간 내에서 선체의 좌표계(Fig. 4.11의 Platform heading)를 기준으로 목표 방향각이 우측인 경우 양의 값을 가지는 상대 거리각 오차, 좌측인 경우 음의 값을 가지는 상대 거리각 오차가 발생한다. 이 결과에 추진기 추력 방향에 따른 부호를 고려하면  $sgn(R_\theta)$ 의 값을 결정할 수 있다.

Fig. 4.12에 Anti-windup 처리된 PID 제어기와 식 (4.2)을 바탕으로 하는 Tracking control 제어를 블록도 형태로 나타내었다. Fig. 4.12 좌 하단의 Way point number는 입력한 경유점 좌표와 GPS의 위치 데이터를 비교하여 현재 플랫폼이 몇 번 경유점에 있는지를 판단하는 블록이다.

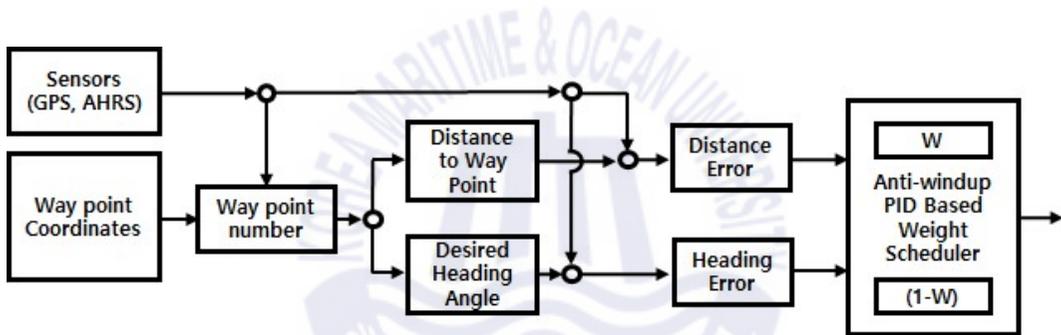


Fig. 4.12 Diagram for tracking control

### 4.3 무인잠수정 상대 방향각, 상대 거리 제어

복합 플랫폼에서 UUV는 방향각 추종, 상대 거리 제어 두 가지 방식을 가지고 있고 운용 콘솔에서 사용자의 판단에 따라 두 가지 방식 중 하나를 선택해 사용한다. 주로 수중 예인체로써 역할을 수행하는 UUV는 상대 방향각 제어 방식을 많이 사용한다.

방향각 추종은 USV의 선체 방향각에 UUV의 선체 방향각을 일치시키기 위해 잠수정의 추진기를 사용 하는 제어 방식이다. USV와 UUV 모두 동일한  $-180^\circ \sim 0^\circ$ ,  $0^\circ \sim 180^\circ$  형태의 출력방식을 가지므로 Fig.4.11에 나타난 방향각 오차 계산 방식

과 부호 계산 방식을 그대로 적용하여 상대 방향각 오차를 계산하며, UUV의 관점에서 desired  $\psi$ 에 USV의 Heading 센서 데이터를 사용하는 차이가 있다. 상대 방향각 오차가 구해지면 PD 기반의 제어를 사용하여 출력을 조정한다.

상대 거리 제어 방식은 USBL이 반환하는 X, Y, Z 데이터를 이용해 두 플랫폼 간의 상대 거리  $d_{REL}$ 를 구하고 USBL이 반환하는 USBL Azimuth 데이터를 통해 상대 방위각  $\psi_{REL}$ 를 이용해 추진기 추력과 추력 방향을 제어하는 방식이다.  $d_{REL}$ ,  $\psi_{REL}$ 는 Fig. 4.13에 나타내었다.

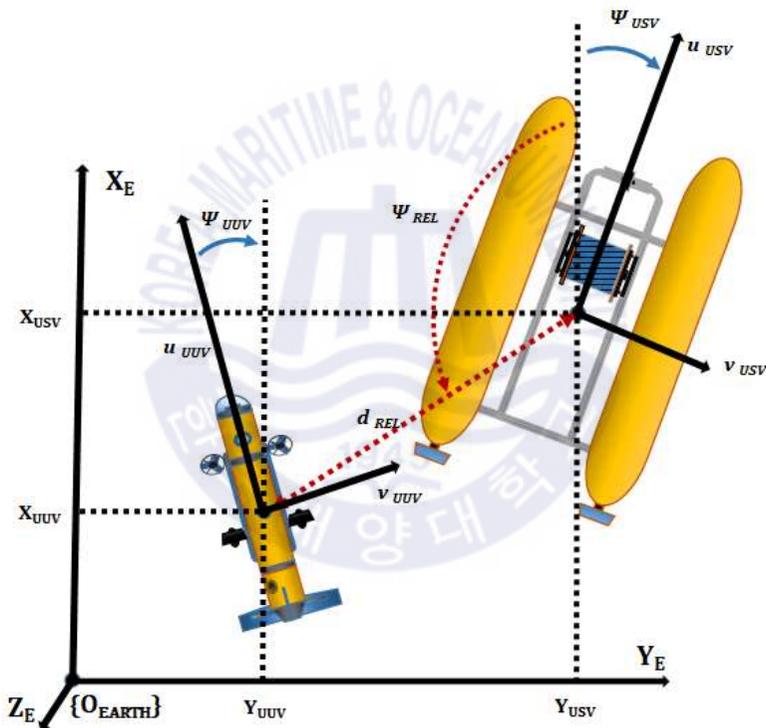


Fig. 4.13 Graphical description of  $\psi_{REL}$  and  $d_{REL}$

상대 방위각을 이용해 USBL 원점(USV에 설치된 USBL Transceiver의 좌표)을 향해 UUV의 선체 방향을 선회시키며 직진하기 위해 USV의 Tracking control과 유사하게 상대 거리를 오차로 하는 제어기의 출력과 상대 방위각을 오차로 하는 제어기 2종류의 PD 제어기의 출력을 더해 추진기의 출력을 결정한다.

#### 4.4 복합 플랫폼 자동 복귀 제어

연안에서의 사용을 목적으로 하는 복합 플랫폼은 통신을 방해할 가능성이 있는 다양한 외부 환경을 고려해야 한다. 연안에서 통신을 방해하는 요소로 해안 단구, 해안 절벽, 시 스택 등으로 인한 환경적인 요인이나 대형 선박의 이동, 해상 구조물, 운용자의 실수로 인한 플랫폼의 충격 등의 인위적인 요인 등이 포함된다. 통신이 원활하게 회복되지 못하는 경우 복귀점으로 지정한 좌표로 돌아오는 기능을 구현했다. 간략화 하면 Fig. 4.14처럼 나타낼 수 있다.

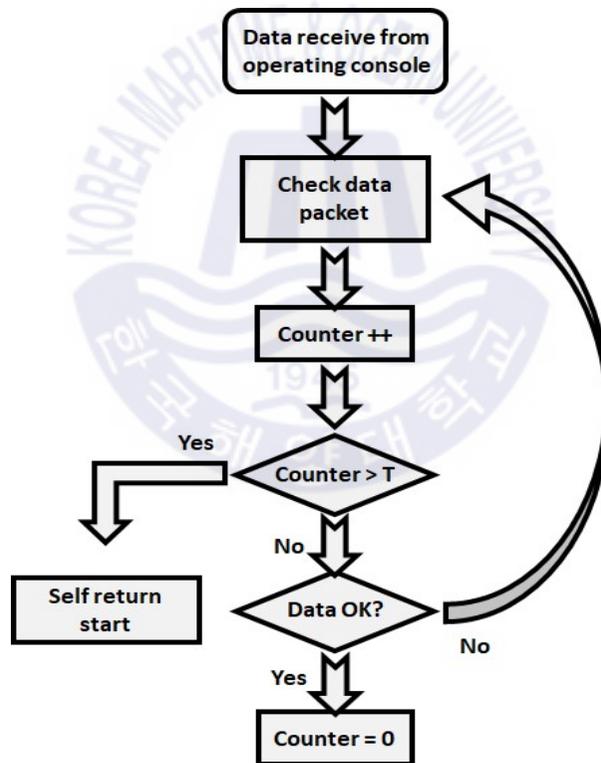


Fig. 4.14 Algorithm for self return

운용콘솔에서 데이터가 들어오면 무결성 검사를 한 후 자동 복귀 카운터 증가가 시작된다. 수신되는 데이터가 있고, 데이터가 무결하면 카운터는 0으로 초기화되고

통신을 통해 수신된 데이터가 없다면 카운터가 계속 증가한다. Fig. 4.14에서 T는 자동 복귀 대기시간으로 운용콘솔을 통해 입력한 T 시간을 대기해도 데이터가 수신되지 않는다면 기존에 수행하던 모든 명령을 취소하고 자동복귀 항해를 시작한다.

현재 USV의 좌표를 기준으로 입력한 복귀점 좌표를 향해 경유점 추종과 동일한 방식으로 단순 복귀하는 설정이 기본으로 되어 있으나 필요에 따라 복귀 경유점을 추가로 입력하거나 복귀 경로를 설정할 수 있다.

## 4.5 복합 플랫폼 추진 제어 시스템

복합 플랫폼의 추진 제어 시스템 흐름의 개략도는 Fig. 4.15와 같다. Fig. 4.1에 나타난 전체 제어 시스템에서 각 플랫폼의 MCU M2가 중요한 역할을 수행한다. 데이터 수신, 수신된 데이터 검사, 제어 알고리즘 연산, 데이터 송신, 데이터 저장을 10Hz 주기로 반복한다.

4.2절에 나타내었듯 복합 플랫폼은 수동 제어와 자동 제어 기능으로 구분하였다. 수동 제어는 조이스틱을 이용하여 USV와 UUV의 추진기와 윈치를 직접 사용자가 제어하는 방식으로 정밀한 조사를 수행하거나 가까운 목표로 이동할 때 사용한다. 이 경우 운용 콘솔에서 추진기의 추력값을 직접적으로 데이터 패킷의 Payload에 포함시켜 USV에 전송한다.

자동 제어 기능은 4.2절과 4.3절에 나타난 USV의 기능들과 UUV의 기능들을 임무에 따라서 조합하여 사용한다. 예를 들어 수심이 5m 이내의 연안에서 경로를 그리며 해저면을 조사하는 경우 USV에 경유점 추종 제어 명령과 UUV의 상대 방향각 제어 명령을 송신한다. 명령을 수신한 USV의 MCU M2가 경유점 추종 제어를 위한 연산을 수행하면서 UUV에 상대 방향각 제어 명령을 송신함으로써 두 플랫폼이 동시에 제어를 수행하게 된다.

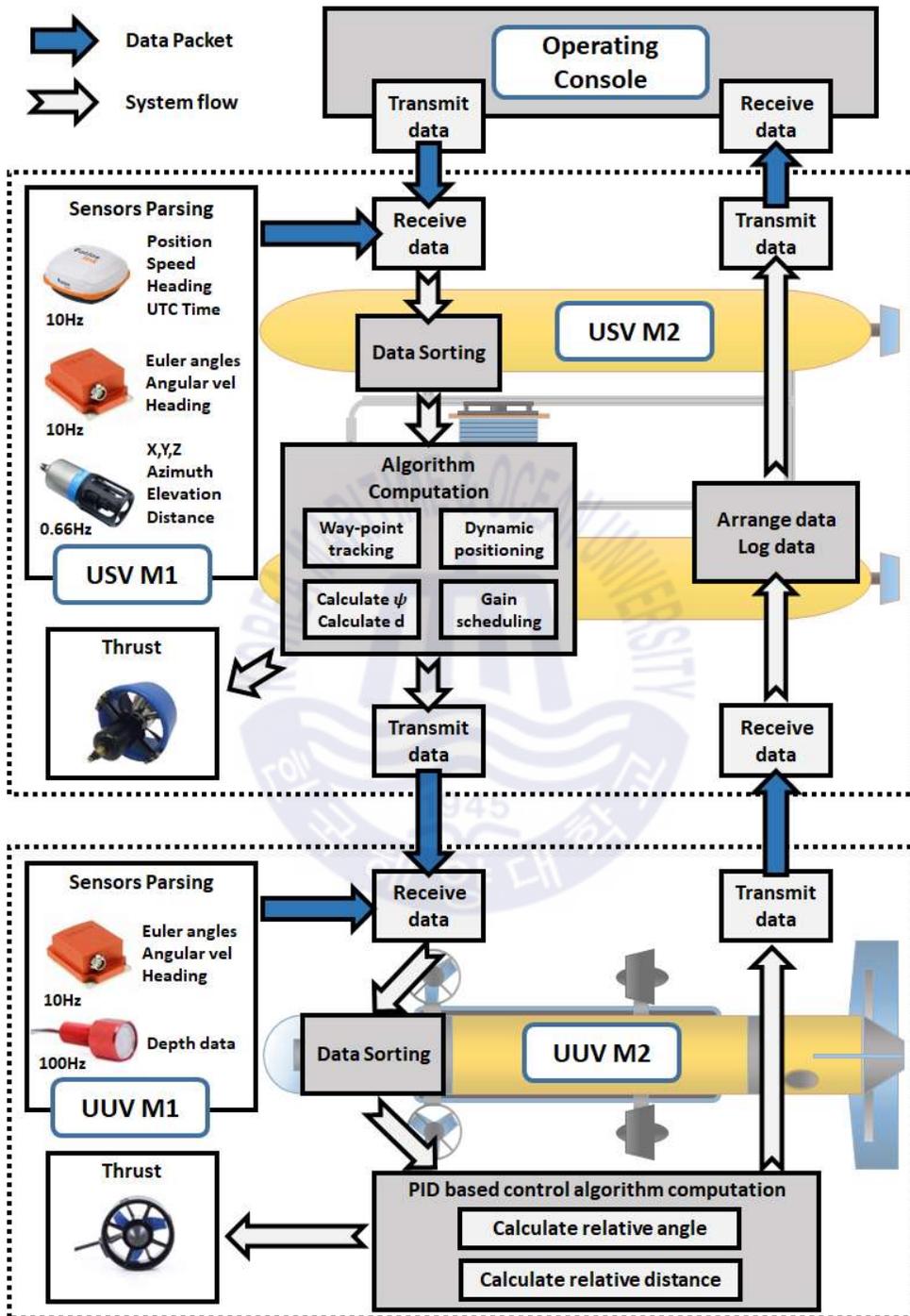


Fig. 4.15 Thrust control diagram

## 5장. 센서 성능 실험 및 복합 플랫폼 실험역 실험

### 5.1 센서 성능 실험

수상에서 항법을 위한 위치, 방향각, 정보를 GPS를 통해 쉽게 취득할 수 있으나 복합 플랫폼에서 UUV의 수중에서의 위치 정보는 USBL, 위치 정보는 AHRS에 의존해서 취득한다. 따라서 수중에서의 효과적인 제어 성능 확보와 실험 후 취득한 데이터의 신뢰도를 위한 센서의 개별 실험이 중요하다.

#### 5.1.1 USBL 성능 실험

한국생산기술연구원 해양로봇센터 공학 수조에서 실험 진행했다. USBL Transponder를 크레인으로 고정하고 Transceiver를 수조 전차에 부착해 X, Y 방향으로 이동하며 데이터를 취득했다. 사용한 USBL 제품은 3.2.3절에 나타내었듯 SeaTrac 社의 X150(Transceiver)와 X010(Transponder)를 사용했다. Fig. 5.1은 수조에 실험을 위해 구성한 장비의 모습들과 수조 좌표계를 나타내었다.

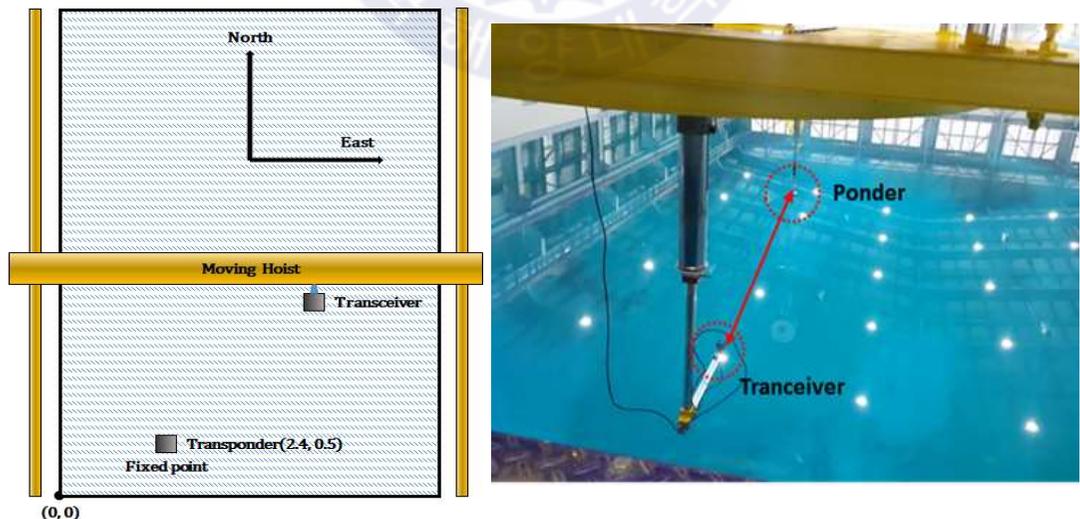
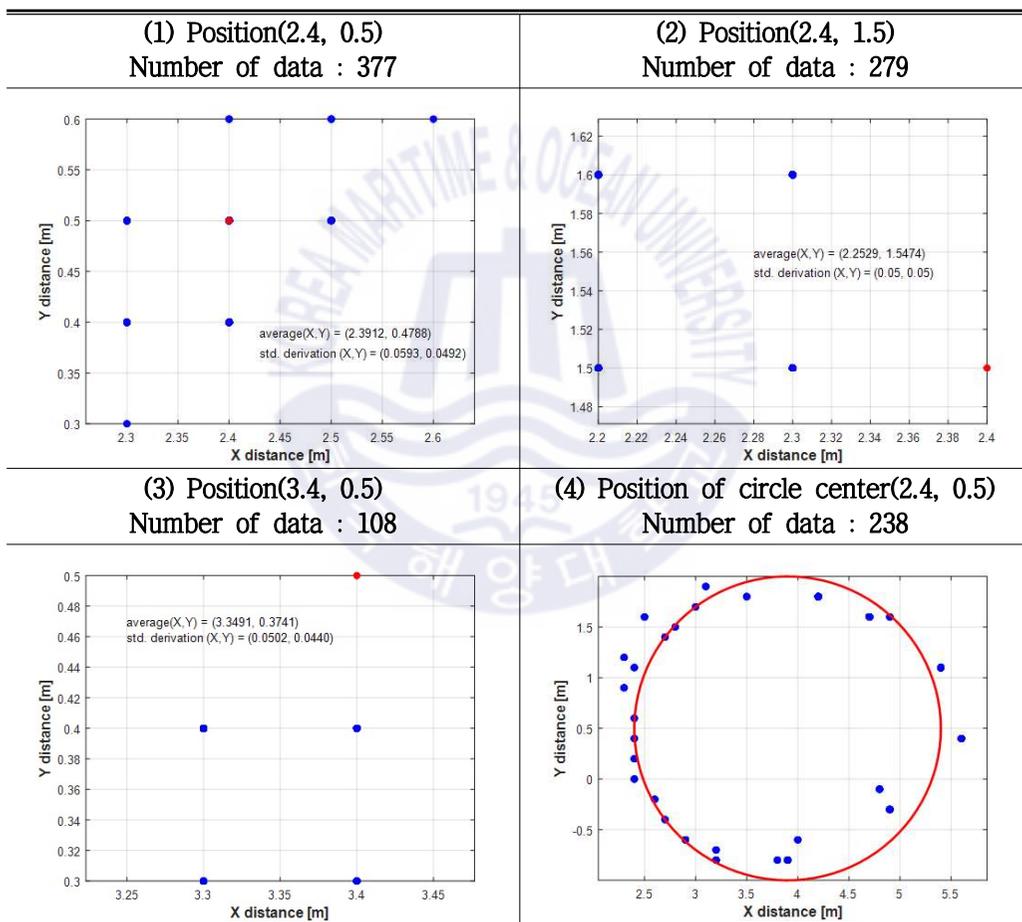


Fig. 5.1 USBL test in water tank

실험을 위해 대여한 수조는 좌 하단을 (0, 0)으로 두고 Y축 방향이 북쪽방향과 일치하도록 설계되어 있다. (2.4, 0.5)에 Transponder를 설치하고 기준위치로 잡았으며 실험을 통해 USBL 센서의 거리 데이터는 NED 좌표계를 기준으로 출력됨을 확인하였다. 두 USBL 장비간의 상대 수심은 0.8m 로 유지하면서 Transceiver의 위치를 이동시킨 뒤 정적인 상태에서의 데이터와 원 운동 하면서 취득한 데이터를 Table 5.1에 나타내었다.

Table 5.1 USBL test results



(1), (2), (3) 의 경우 정적인 상태에서의 USBL 센서의 거리 출력값을 나타낸다. (1)번 실험의 경우 각 축과의 오차는 0.88cm 2.12cm (2) 14.71cm -4.74cm (3) 5.09cm 12.59cm 로 각각 나타났고 거리에 비례하여 오차의 크기가 커짐을 확인할 수 있었

다. 측정거리가 증가할수록 측정오차의 증가함을 확인할 수 있는데 이는 거리증가 폭 대비 상대수십이 알고 수조 환경에서의 노이즈의 영향이 큰 것으로 추정된다.

### 5.1.2 AHRS 성능 실험

AHRS는 USV, UUV의 자세 및 방향 데이터 취득을 위해 부착된다. 그 중 방향 데이터는 적분 오차나 외부 요인으로 인해 값이 발산하는 경우가 많다. 사용한 AHRS는 MTI-30 모델로 여러 가지 설정을 통해 이를 최소화 할 수 있고 자체 자기장 보정 필터가 외부 자기장 변화에 대응하는 시간 등 보정 필터 자체에 대해 이해하면 발산하는 경우를 최소화 할 수 있다. GPS와 AHRS를 일직선의 구조물에 고정하고 같은 방향을 향하도록 설치한 뒤 취득한 센서 데이터를 비교하며 최적의 설정을 찾고 방향각 오차의 정도를 확인하는 실험을 진행했다.

실험은 USV에 부착된 GPS가 아닌 신뢰도 높은 방향각 데이터를 취득할 수 있는 GPS 장비를 사용하였으며 그 상세사양은 Table 5.2와 같다.

**Table 5.2** Specification of the heading reference GPS

Product name	Hemisphere H200		
Communications	NMEA 0183, UART		
Positioning accuracy		Horizontal	Vertical
	SBAS	0.3m	0.6m
	DGPS	0.3m	0.6m
	RTK	10mm+1ppm	20mm+2ppm
Heading accuracy	0.15° rms @ 1.0m antenna separation		
Input voltage	3.3 VDC		
Power consumption	< 2.1W nominal GPS		

실험은 한국해양대학교 교내에서 진행하였다. GPS와 AHRS를 고정한 구조물을 차량에 부착한 후 교내를 주행하며 데이터를 취득하였으며 GPS와 AHRS 데이터에 별도의 필터링을 하거나 보정을 하지 않았으며 제조사에서 제공하는 자체 프로그램을 통해 데이터를 취득했다. AHRS의 지자기 보상 필터의 설정, 초기화 방식에 따라 다

양한 경우의 수를 실험하였으며 그 중 하나의 결과를 Fig. 5.2에 나타내었다.

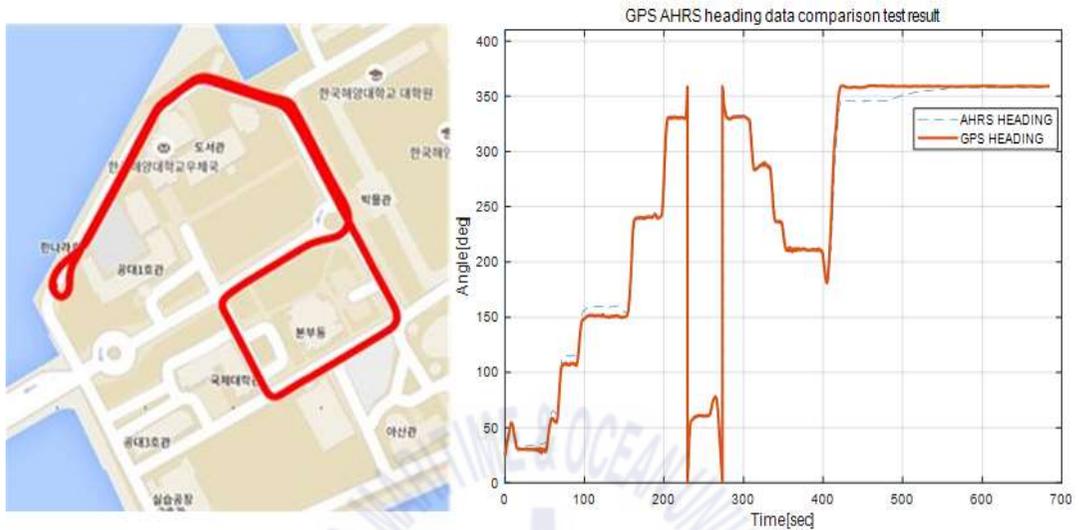


Fig. 5.2 Result of GPS and AHRS test

Fig. 5.2에서 왼쪽은 GPS와 AHRS를 고정한 차량이 실제로 이동한 경로를 나타내고 우측은 이동중 GPS와 AHRS에서 취득한 방향각 데이터를 나타낸다. 주행 시작, 주행 종료 직후 100 ~ 150초간 데이터가 10도 이내의 오차를 확인할 수 있는데 이 시간은 MTi 사의 자체 지자기 보상 필터의 알고리즘에 의한 지연시간으로 이 시간을 제외한 구간에서는 1도 이내의 오차만 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 UUV를 수중에서 구동할 때 구동 직후와 정지 직후 100여초의 시간을 제외한 구간의 데이터는 신뢰도가 있음을 확인했다. 이동하는 동안 두 센서의 값의 차이는 평균 3.53도 표준편차 3.88도를 나타내었다.

일련의 실험들을 통해 USBL과 AHRS의 성능을 확인하였으며 실험을 수행하며 별도의 센서 좌표계를 일치시키는 과정을 생략하기 위해 GPS, USBL, AHRS의 내부 설정을 통해 좌표계를 통일 시키고자 하였다. 각각의 제조사에서 제공하는 설정 프로그램을 통해 3개의 센서의 좌표계를 NED 좌표계로 통일 하였으며 실험 과정에서 확인하였다.

## 5.2 복합 플랫폼 실해역 성능 실험

복합 플랫폼의 실해역 실험 전 USV기준의 역학 모델을 유도하여 시뮬레이션을 수행하여 플랫폼의 거동과 제어기의 성능을 확인하였으나 본 논문의 주제와 제어기의 성격과 다소 상이하므로 이에 대한 내용은 부록 A에 수록하였다.

복합 플랫폼의 실해역 실험 장면은 Fig. 5.3에 나타내었다. 연안 해양 조사 플랫폼을 목적으로 구성한 복합 시스템의 전반적인 성능을 확인하고 플랫폼의 자동 제어 성능을 확인하였다. 실험 장소는 한국해양대학교 요트계류장 인근 해역, 부산항 외부 방파제 인근 두 곳에서 주로 진행하였다.



Fig. 5.3 Field test

## 5.2.1 AP Bridge 통신 장비 실험

플랫폼의 주 통신 장비인 AP Bridge는 육상과 플랫폼 간의 통신을 위한 핵심 장비로 세부 사항은 3.2.1절에 나타내었다. 통신 장비의 통신 거리는 연안 탐사라는 목적에 부합하기 위해 20km로 설정하고 선정하였으며 실험역 시험 전 장비의 통신 거리와 실험역 시험시 안정도의 확인을 위해 실험역 시험 범위를 포함하는 거리에 수신부 송신부 안테나를 각각 배치하고 통신거리 시험을 진행하였다. 또한 다양한 영상 장비 데이터와 소나 데이터 실시간 취득을 위한 빠른 통신속도를 위해 이더넷 급 통신 속도를 목표로 했으며, 이더넷 통신 방식중 10BASE-T에 해당하는 10Mbps 이상의 통신속도를 목표로 선정하였다. 통신 속도를 확인하기 위해 디바이스와 디바이스 간의 통신속도를 측정하는 프로그램 iperf를 통해 통신속도를 시험하였고 통신 거리 실험과 통신 속도 실험의 결과는 Fig. 5.4와 같다.

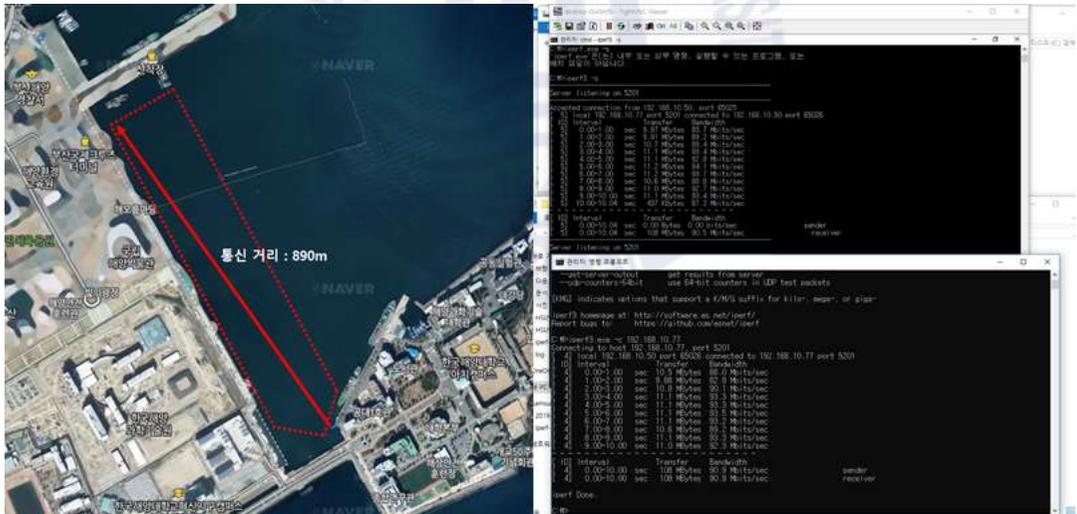


Fig. 5.4 Communication range and speed test

약 890m 거리에서 iperf 프로그램으로 통신속도를 측정한 결과 복합 플랫폼을 보 관하는 실내에서는 최소 89.1Mbps, 실외에서는 최소 61.3Mbps 의 통신속도를 확인 할 수 있었다.

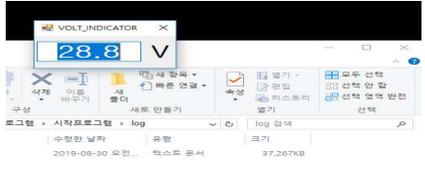
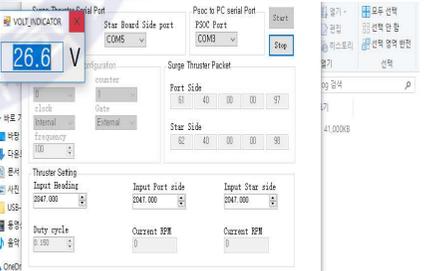
## 5.2.2 플랫폼 구동 시간 실험

배터리의 가용 운용시간을 측정하기 위해 배터리를 최대용량으로 충전 후 일정 시간동안 플랫폼을 사용하며 강하된 전압수치를 측정하여 총 가동 시간을 추정했다. 선정된 배터리는 SOC(State Of Charge) 0% 에서 100%까지의 전압이 19.6V에서 29.4V 이다. 방전 허용정도는 대상의 용도나 목적에 따라 다르지만 리튬이온셀 방전에 관한 연구 결과나[12] 배터리 팩 제조사의 권고에 따라 SOC 30% 허용하였다. 즉, 복합 플랫폼의 전압이 약 22.5V에 도달했을 때 방전이라고 판단한다. 총 탑재되는 배터리의 개수는 총 4개이나 전압의 변화를 크게 하기 위해 2개의 배터리만 사용하여 실험을 진행하였다.

실험은 총 4시간 진행되었으며 실험 시간동안 한 바퀴 이동하는데 30분 정도 소요 될 사각형 형태의 경유점을 지정하여 경유점 추종 제어를 하도록 하였고 매 30분 마다 2가지 다른 방식으로 전압을 측정하였다. 전압 측정 결과는 Table 5.3과 같다.

4시간의 실험이 끝난 후 2 가지 방법으로 측정된 전압의 평균은 26.7V로 시작 전압의 평균을 29V로 계산했을 때 4시간 동안 2.2V가 강하되었음을 확인할 수 있다. 총 가용 전압의 폭은 29.0V - 22.5V로 6.5V 이다. 비례식으로 계산하면 11.8시간이고 전체 전원의 절반만 사용한 점을 고려해 2배로 늘리면 총 23.6시간 운용가능하다는 것을 추정할 수 있었다. 본 실험은 많은 가정과 불확실한 정보(배터리 셀에 대한 자세한 사양)를 기반으로 수행되었고 강하된 전압수치로 전력 소모량을 추정하는 것이 일반적이진 않으나 앞서 인용한 연구결과에서 전압 대 SOC 그래프를 참고할 때, 전압수치가 급감하는 구간을 제외하면 제한적인 선형성을 보여 실험을 진행했다. 실험 결과 또한 기존의 목적이었던 14시간 40분을 크게 상회하는 결과를 확인하여 목적을 달성했다고 판단하였다.

Table 5.3 Result of operation time test

	배터리 전량계 측정값	DC-DC 박스 Volt Meter 측정값
실험 준비 6 : 30		
	29.2V	28.8V
실험 시작 7 : 00	28.7V	28.6V
7 : 40	28.3V	28.1V
8 : 10	28.3V	28.0V
9 : 00	27.8V	27.7V
9 : 30	27.7V	27.6V
10 : 00	27.2V	27.1V
10 : 30	27.0V	26.9V
실험 종료 11 : 00		
	26.8V	26.6V

### 5.2.3 플랫폼 자동 복귀 시험

복합 플랫폼의 연안에서의 임무 수행 중 통신장비의 문제, 혹은 누수 등의 문제로 긴급 복귀 해야 하는 경우를 대비해 자동 복귀 기능을 설정하고 이를 실험해역에서 실험하였다. 육상과 USV 간의 통신은 88바이트 길이의 정해진 통신 패킷을 송, 수신 하는데 USV에 패킷이 수신되면 MCU 내부 카운터를 작동시켜 시간을 측정하며 다음 통신 패킷이 들어오면 카운터를 초기화 한다. 이 때 선체에 문제가 발생하거나 통신장비에 문제가 생겨 상호간 패킷 송, 수신을 못하는 경우가 발생하면 초기화 되지 못한 카운터는 시간을 지속적으로 누적하게 되며 이 누적된 시간이 육상 운용콘솔을 통해 설정한 자동 복귀 판단 시간을 넘어서면 진행되는 모든 프로세스를 초기화하고 운용콘솔을 통해 입력된 RP(Rendezvous point)로 천천히 접근하게 프로그래밍 하였다.

실험은 두 가지의 방법으로 나뉘서 수행했다. 첫째, 제어시스템 내부의 문제로 통신이 멈추는 상황을 가정하여 운용 콘솔의 기능을 이용해 통신을 차단하는 방법. 두 번째, 외부의 충격이나 물리적인 이유로 통신 관련 하드웨어의 손상을 가정하여 통신 케이블을 뽑는 방법. 두 가지 모두 실험을 수행했고 입력한 자동 복귀 판단 시간 2분 후에 플랫폼이 RP로 돌아옴을 확인하였다. 실험 결과는 Fig. 5.5에 나타내었다.

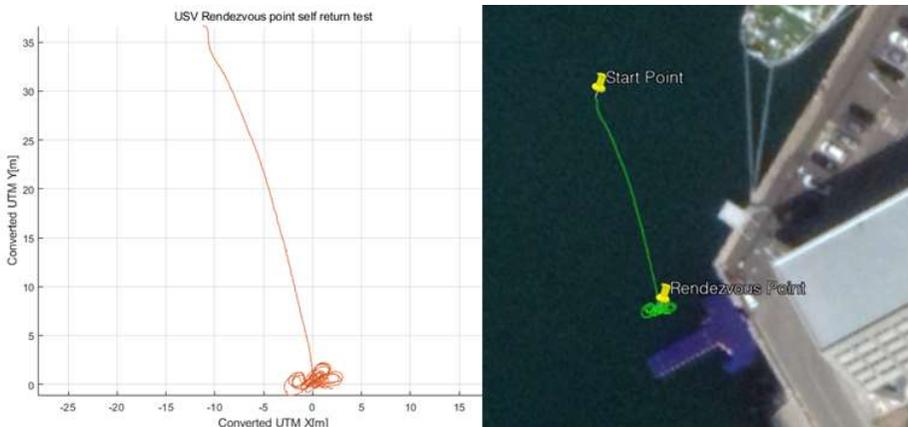


Fig. 5.5 Result of self return test

Fig. 5.5의 좌측은 위도, 경도 데이터를 UTM 좌표계로 변환한 경로를 나타낸 결과이고 우측은 수신한 위도, 경도 데이터를 구글 어스(Google Earth)에 나타낸 결과이다. 인위적으로 통신이 두절된 시작지점(Start Point)에서 복귀점을 향해 플랫폼이 전진하고 복귀점에 도착하였을 때 동적 위치제어를 수행함을 확인하였다.

#### 5.2.4 상대 거리 제어 실험

4장에 언급한 UUV 제어 방식은 크게 USV에 대한 방향각 추종 제어와 상대 거리 제어 두 가지로 나뉜다. 이 중 상대 거리 제어는 실제 해류의 영향을 받는 깊은 수심 환경인 부산항 외부 방파제에서 실험을 수행했다. 실험 수행 지역은 Fig. 5.6에 나타내었다.



Fig. 5.6 Relative distance control test zone

실험 장소에서 수동 조종으로 임의의 경로로 플랫폼을 움직였으며 수심이 20m 이내라는 기존에 측성된 해역 수심 정보를 참고해 UUV는 17m 잠수시킨 상태로 실험을 진행했다. 국립해양조사원의 해양정보에 따르면 실험을 진행했던 당시 이 지역의 조류는 남서 방향 0.7 ~ 0.93 노트로 추정되며 실험 시간 중 풍향은 남 ~ 남남

동, 풍속은 평균 4.15 최대 6.5 노트임을 확인했다. 정리된 실험 결과는 Fig. 5.7과 Fig. 5.8에 나타내었다.

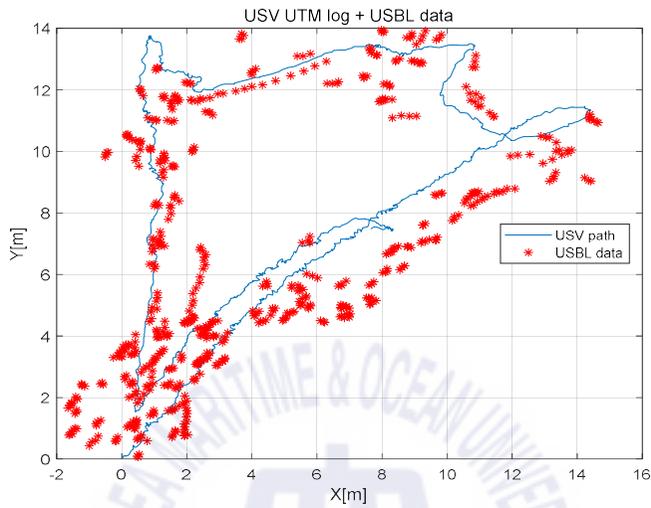


Fig. 5.7 USV path and USBL data of relative distance control test

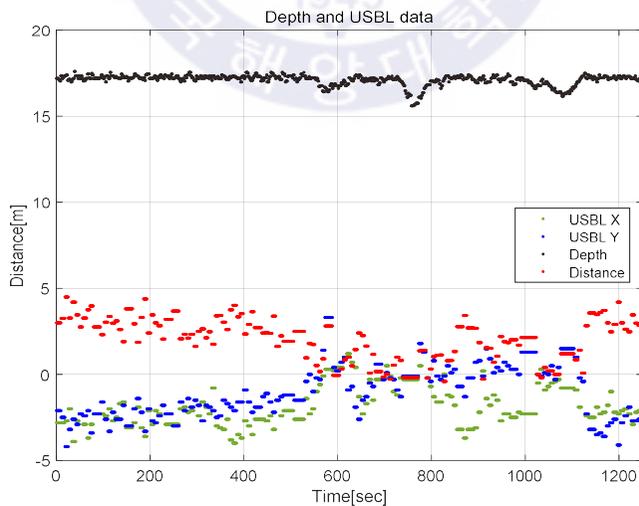


Fig. 5.8 USBL and Depth sensor data of relative distance control test

Fig. 5.7은 USV의 이동 경로와 USBL 좌표를 나타낸다. Fig. 5.8은 UUV 수심 센서로 수신한 데이터와 USBL의 X, Y 데이터 그리고 수신한 데이터를 이용해서 구한 USV와 UUV의 상대거리(Fig. 5.8 우측의 Distance 데이터를) 나타내었다. UUV를 17m 깊이로 잠수시키고 USV를 2.5 ~ 3 노트로 이동시키고 이를 UUV로 추종시킬 때 상대 위치오차는 5m 이내의 오차로 제어함을 알 수 있다.

### 5.2.5 동적 위치 제어 실험

동적 위치 제어(Dynamic Positioning, DP) 실험은 해양대학교 앞 요트 계류장 인근에서 수행하였고 총 20분간 수행하였으며 잠수정은 상대 방향각 제어를 실행시켰다. Fig. 5.9는 USV GPS 데이터를 통해 나타낸 플랫폼의 이동경로이다. Fig. 5.9의 좌측은 수신된 GPS데이터를 구글 어스에 나타낸 결과이고 우측은 UTM 좌표계(Universal Transverse Mercator coordinate system)로 변환한 경로를 나타낸 것이다. 내부의 녹색 원이 동적 위치제어 점을 중심으로 반경3m의 원이고 이 범위 내에 표기되었던 좌표의 개수를 분석한 결과 전체 20분의 시간 중 98.2% 동안 반경 3m 내에 있음을 확인할 수 있다.

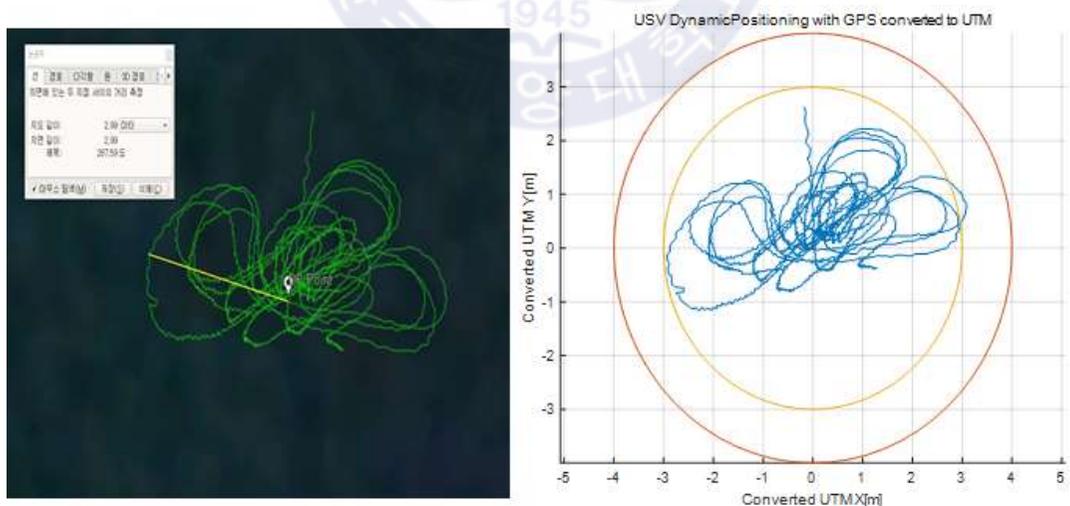


Fig. 5.9 Trajectory of the platform while dynamic positioning

Fig. 5.10은 동적 위치 제어를 수행하는 동안 USV와 UUV의 자세 값을 나타낸다. 동적 위치 제어 중에는 Heading Control로 인한 제자리 선회 운동의 반복이므로 USV의 Roll과 Pitch각의 경우  $+2^{\circ} \sim -2^{\circ}$  사이의 값을 나타낸다. UUV의 경우 수중 케이블로 인한 외력으로 자세 값의 변화가 USV보다 큰 경향을 보였다. Roll은  $+5^{\circ} \sim -7^{\circ}$  사이, Pitch는  $+4^{\circ} \sim -7^{\circ}$  사이의 값을 나타내었다.

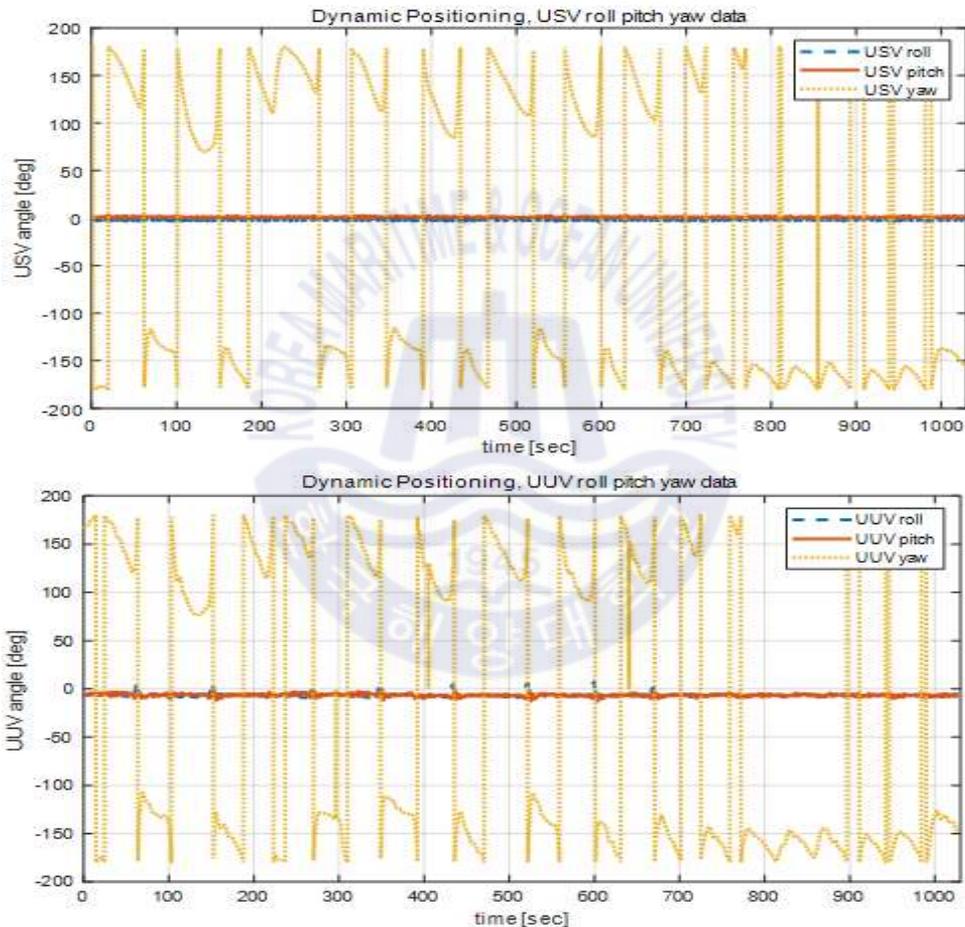


Fig. 5.10 Attitude values of USV, UUV while DP

동적 위치제어는 4.2절에 나타내었듯 선회, 직진의 반복으로 이루어진다. Fig. 5.11은 동적 위치 제어 수행중의 선회를 위한 USV의 방향각 오차를 나타내었다. 방향각 오차 데이터를 통해 수차례의 선회 운동이 일어났음을 확인할 수 있다.

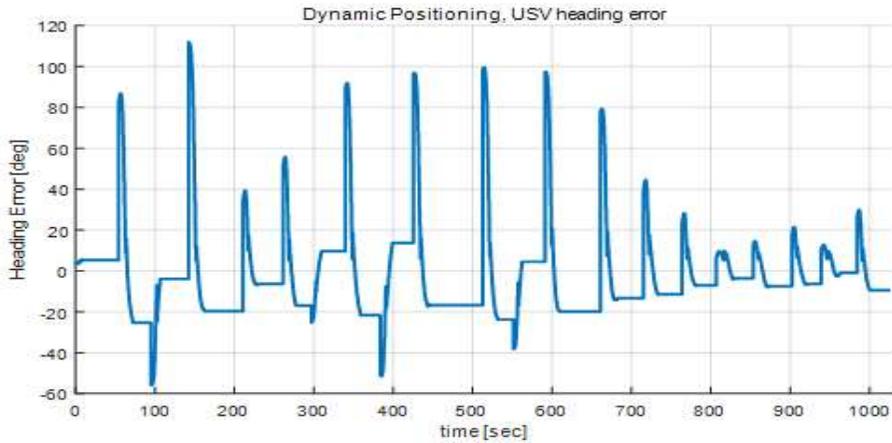


Fig. 5.11 USV heading error while DP

시간이 지남에 따라 방향각 오차가 줄어드는 경향도 확인할 수 있는데 이는 Fig. 5.9에 나타난 것처럼 동적 위치 제어점에 플랫폼이 접근하고 그 후에 동적 위치 제어가 시작되는 알고리즘의 특성에 기인한다. 초기 접근 시 속도로 인한 관성의 영향으로 한동안 큰 폭으로 방향을 조정하다 서서히 그 정도가 작아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 5.12는 동적 위치제어 중 DP점을 향한 거리 오차를 나타낸 결과이다.

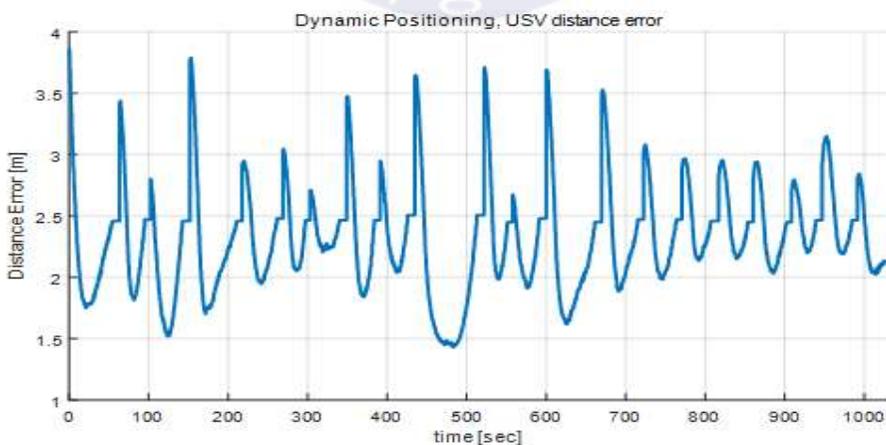


Fig. 5.12 USV distance error while DP

방향각 오차의 경향과 유사한 변화를 나타낸다. DP 지점에 도착한 후 거리 오차가 최대 4m를 나타내고 700초 이후 대부분 거리 오차가 3m 이내임을 확인할 수 있다.

Fig. 5.13은 동적 위치 제어 중방향각 오차와 거리 오차를 이용한 USV 추진기의 추력의 변화를 나타내고 Fig. 5.14는 USV와 UUV의 방향각을 동시에 나타냄으로써 동적 위치 제어 중 UUV의 상대 방향각 제어의 결과를 나타내었다.

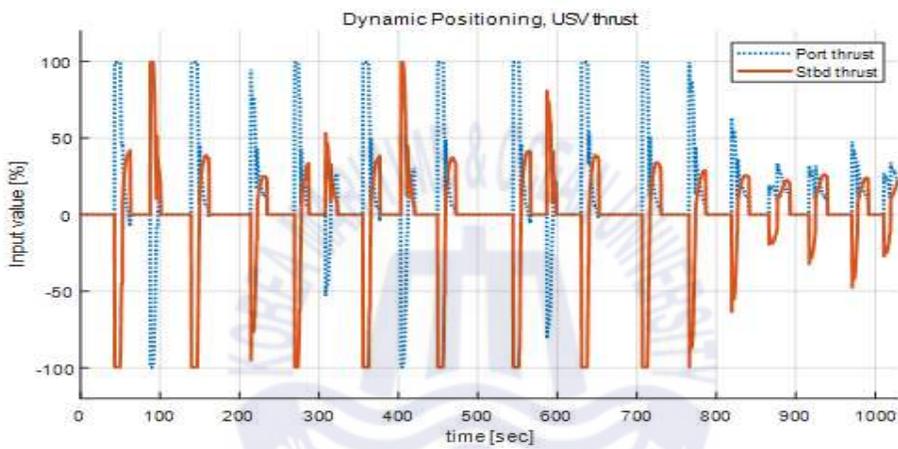


Fig. 5.13 USV thrust input values while DP

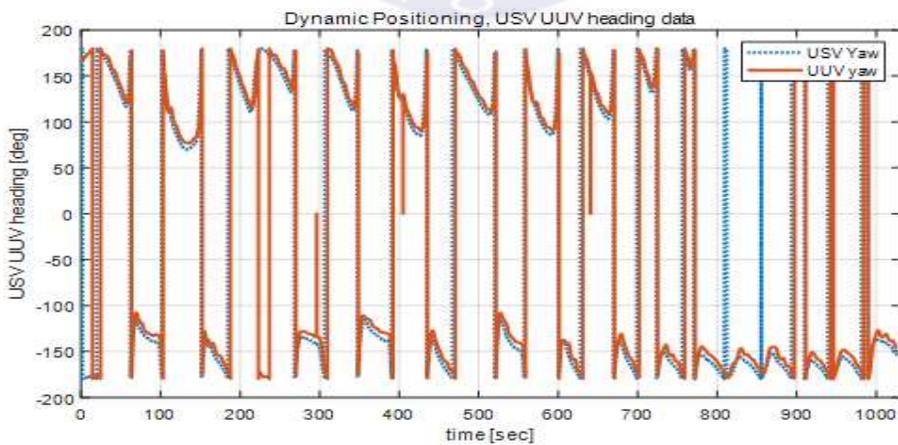


Fig. 5.14 heading data of USV, UUV while DP

추진기의 추력 값은 시간이 따라 감소하는 경향을 보이던 방향각, 거리 오차와 유사하게 감소함을 확인할 수 있고 Fig. 5.14의 결과를 통해 동적 위치 제어 수행 중 UUV의 상대 방향각 제어가 잘 수행되었음을 확인할 수 있다.

### 5.2.6 경유점 추종 제어 실험

경유점 추종 제어 실험(Way point tracking, WP)은 동적 위치 제어 실험과 동일한 장소에서 수행되었다. 운용 콘솔 상의 지도 프로그램에서 임의의 4개의 점을 잡아 직사각형 형태를 만들어 추종하며 주행하게 하였고 좌표의 위도 경도 정보는 Table 5.4에 나타내었다. Fig. 5.15에 경유점 추종 제어 수행 중 플랫폼의 이동경로를 나타냈다.

Table 5.4 Coordinates for way point tracking control

Way points	Latitude	Longitude
Way point 1	35.076380	129.084503
Way point 2	35.076008	129.083708
Way point 3	35.074855	129.084510
Way point 4	35.075195	129.085328

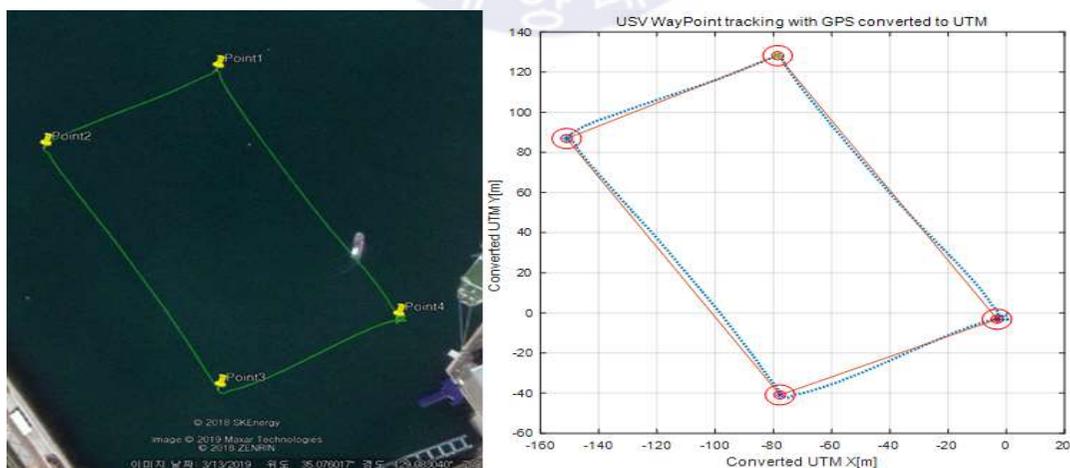


Fig. 5.15 Trajectory of the platform while way point tracking

실험을 진행한 해역의 수심은 만조 시 6m 내외로 UUV를 3m 잠수 시킨 후 실험 경로 추종 제어를 수행하였으며 UUV는 상대 방향각 제어를 수행케 하고 실험을 진행하였다. Fig. 5.15의 좌측은 수신된 GPS 위치 데이터를 구글 어스 프로그램에 나타낸 결과이고 우측 결과는 UTM 좌표계로 변환하고 경유점과의 직선 경로와 플랫폼의 이동 경로를 나타낸 결과이다. Fig. 5.16은 Fig. 5.15의 우측 결과를 확대한 모습이다.

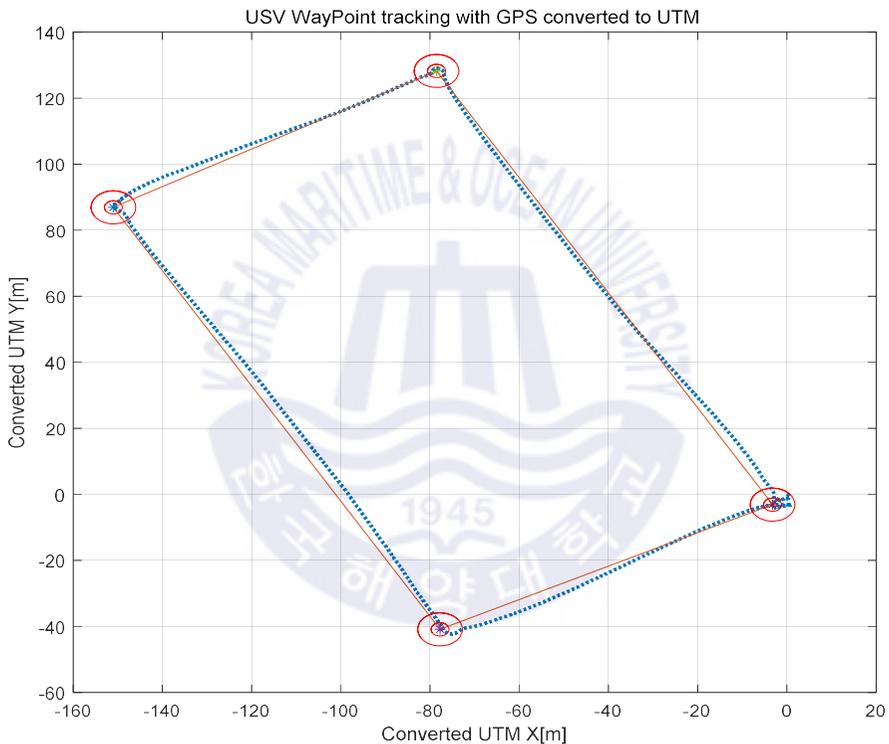


Fig. 5.16 Enlarged trajectory while way point tracking

Fig. 5.16의 실선은 경유점 간 직선을 연결한 가상의 선이고 점선이 실제 플랫폼이 이동한 경로이다. 경유점 주변의 원은 경유점에서 반경 2m와 5m의 가상의 원을 그린 것이다. 가상의 경로에 대해 실제 주행 경로의 오차는 4m 이내인 것을 확인했다. 각 경유점에서의 선회와 경유점 기준으로 이탈한 정도를 확인하기 위해 경유점마다 확대한 결과를 Fig. 5.17에 나타내었다.

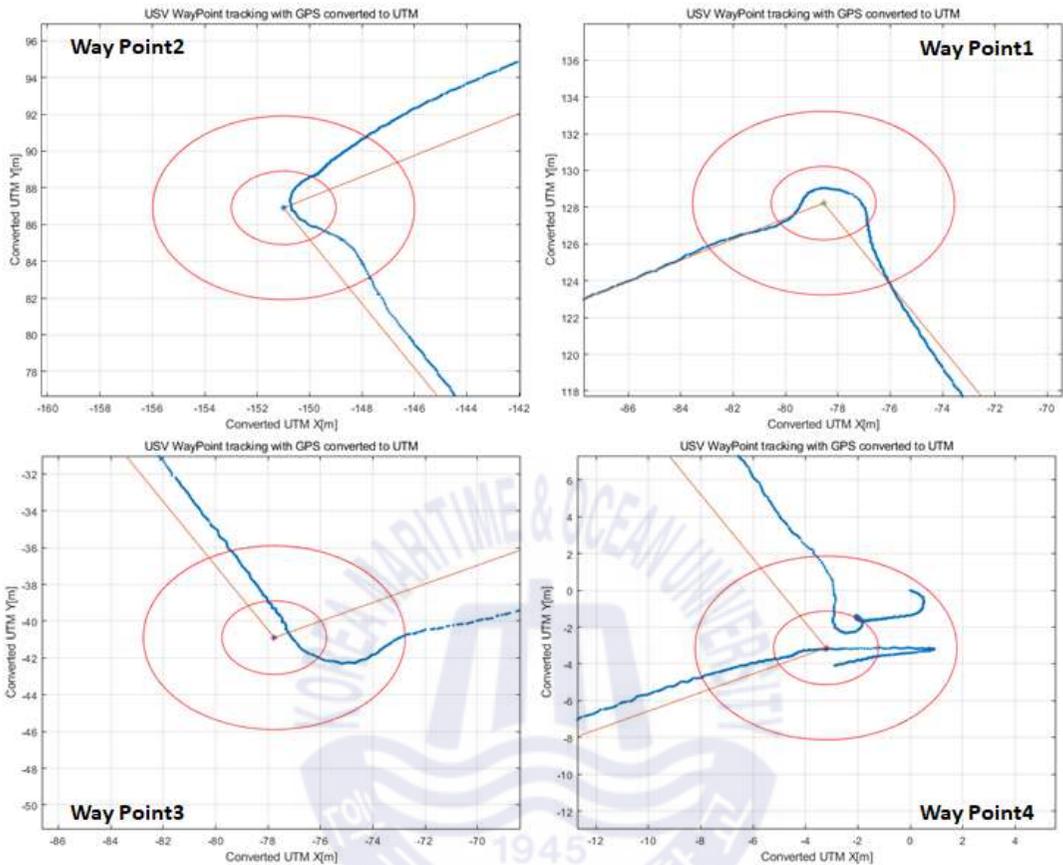


Fig. 5.17 Platform trajectory near way points

1번, 2번에 청색 점선으로 나타낸 USV의 실제 경로가 2m 반경의 원 내에서 선회함을 확인할 수 있었고 3번 좌표의 경우 5m 반경 내에서 선회함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5.18은 경유점 추종 제어를 수행 중 USV와 UUV의 자세 값을 나타낸 결과이고 점선은 각 경유점에 도착한 시점을 나타낸 것이다. 실험 중 최대 2.5노트의 속도로 움직였고 쌍동선형 선체인 USV의 경우 주행 중 Roll, Pitch값의 변화가 큰 변화폭 없이  $+3^{\circ} \sim -3^{\circ}$  이내의 안정된 값을 가짐을 확인할 수 있다. 잠수정은 Tracking control, 즉 직진운동 하는 동안 UUV의 Roll, Pitch 값은 일정하게 유지하는 경향을 확인할 수 있다. 경유점에 도착하고 선회하는 구간동안 Roll, Pitch는 0에 가까워지

는데 이는 제자리 선회중일 때 직선 운동에 비해 수중케이블에 의한 장력이 상대적으로 작아지게 되고 USV를 따라 UUV도 선회하므로 잠수정에 작용하는 외력이 크게 줄어들면서 자세 값이 중립상태인 0도에 가까워지는 과정이 나타난 것이다.

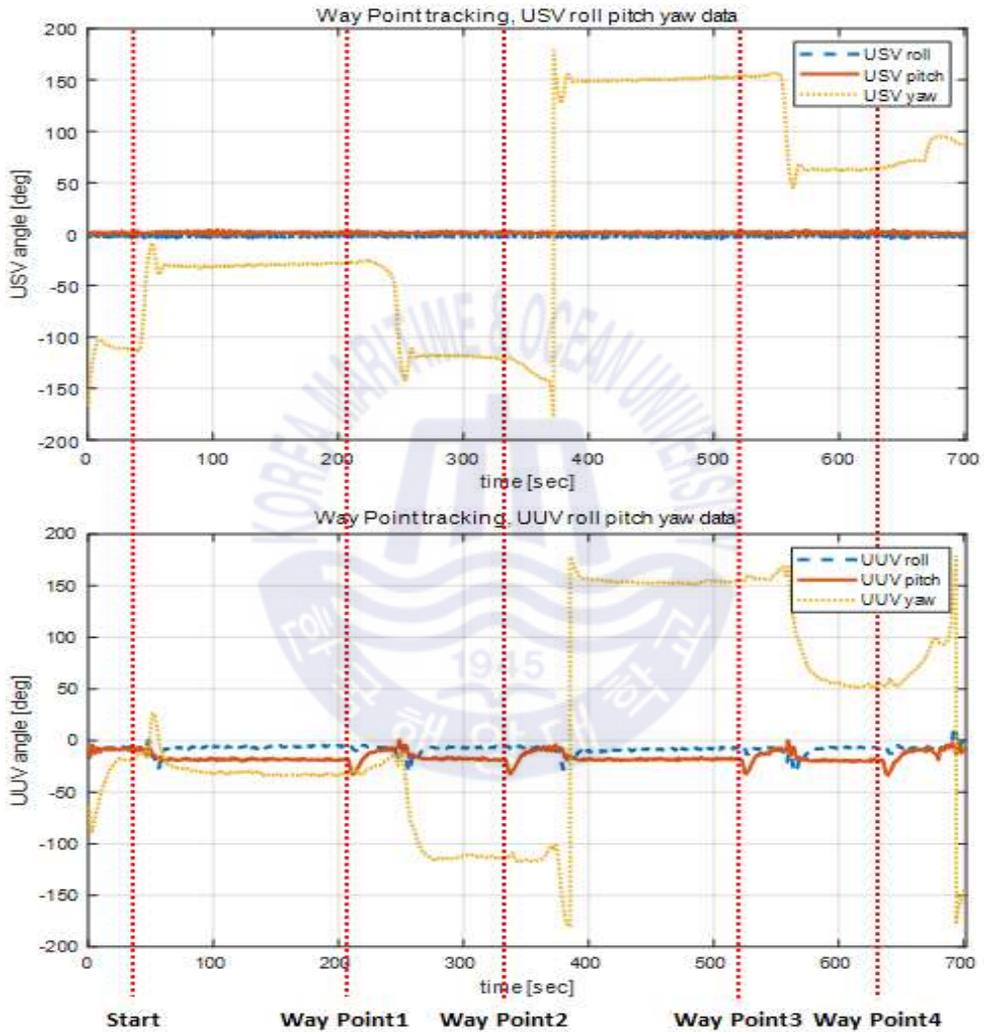


Fig. 5.18 Attitude values of USV, UUV while WP

Fig. 5.19에 경유점 추종 제어를 수행하는 동안 USV의 방향각 오차를 나타내었다. 선회 동작이 발생할 구간에만 방향각 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 경유점에 도착 후 즉시 선회를 하지 않고 일정시간 후에 선회하는 것은 잠수정이 충분히 따

라운 후 다음 경유점을 향해 출발하기 위해 시스템에 지연 시간을 인위적으로 입력한 결과이다.

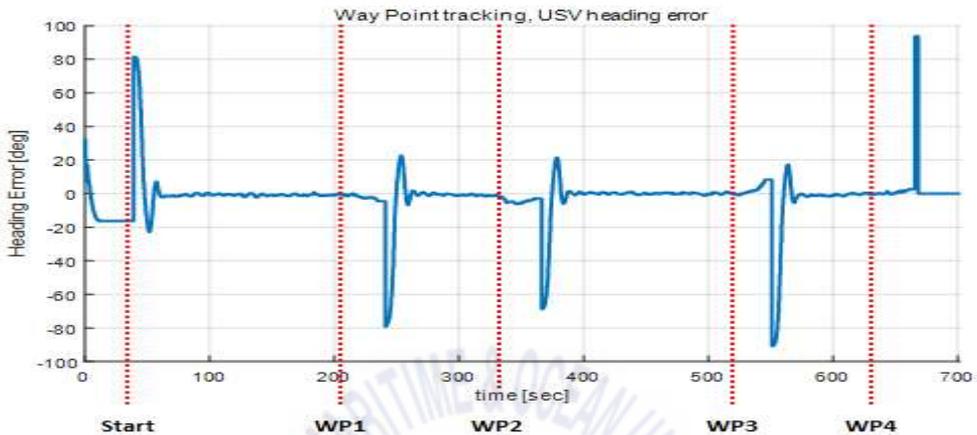


Fig. 5.19 USV heading error while WP

Fig. 5.20에 경유점 추종 제어를 수행하는 동안 USV의 방향각 오차를 나타내었다. Tracking Control이 시작하는 순간 거리 오차는 최대치가 되고 경유점을 향해 직진하면서 서서히 오차가 감소함을 확인할 수 있다.

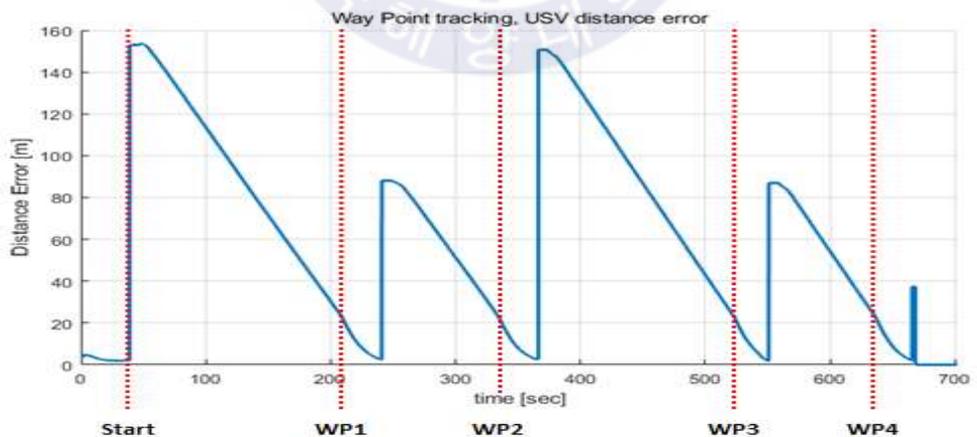


Fig. 5.20 USV distance error while WP

Fig. 5.21은 경유점 추종 제어중 방향각 오차와 거리 오차를 이용한 USV 추진기의 추력의 변화를 나타낸 결과이고 Fig. 5.22는 경유점 추종 제어중 센서로 취득한 USV와 UUV의 방향각 값을 동시에 나타낸 결과이다.

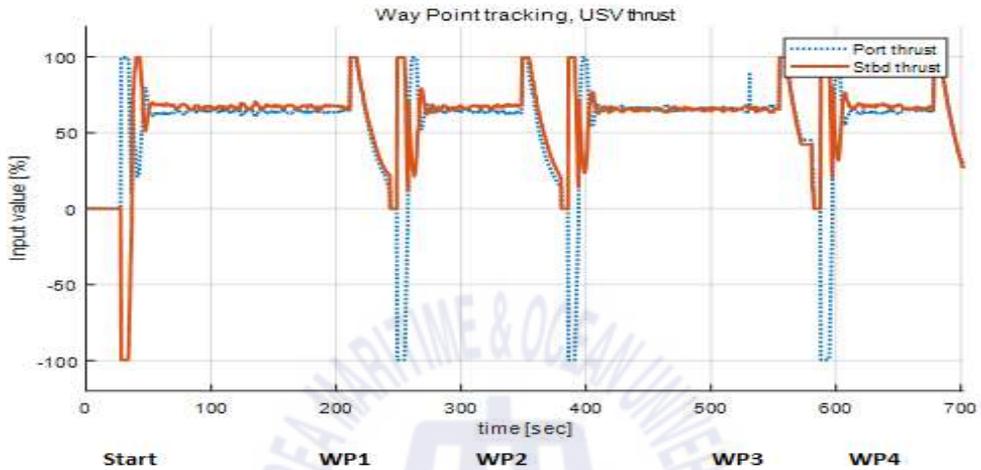


Fig. 5.21 USV thrust input values while WP

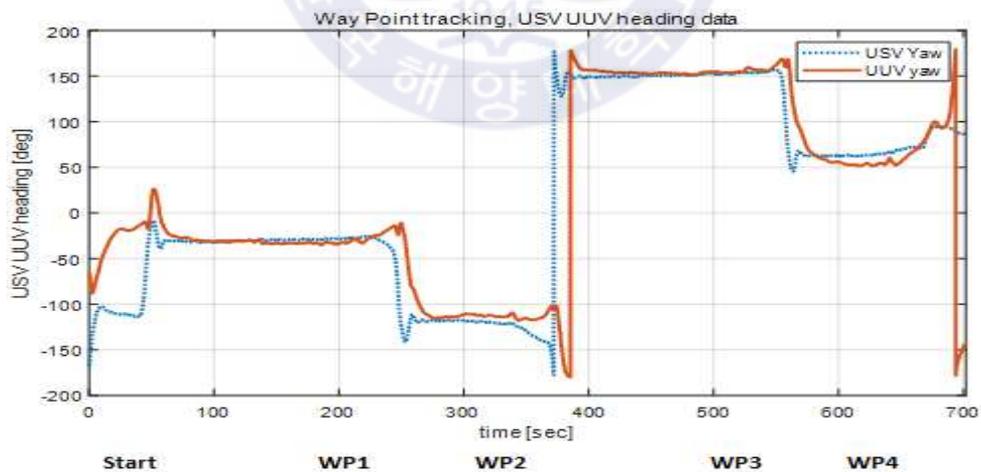


Fig. 5.22 Heading data of USV, UUV while WP

Fig. 5.22의 USV와 UUV의 센서 방향각 데이터를 분석하면 USV가 경유점 추종 제어를 수행하는 동안 UUV의 상대 방향각 제어가 설계 의도에 맞춰 수행되었음을 확인할 수 있다. USV와 UUV의 간의 경로 추종 정도는 수신한 USBL의 데이터를 통해 유추할 수 있다. USBL의 X, Y 데이터를 UTM으로 변환된 USV의 경로와 동시에 시각화 하여 확인 하였고 그 결과는 Fig. 5.23에 나타내었다.

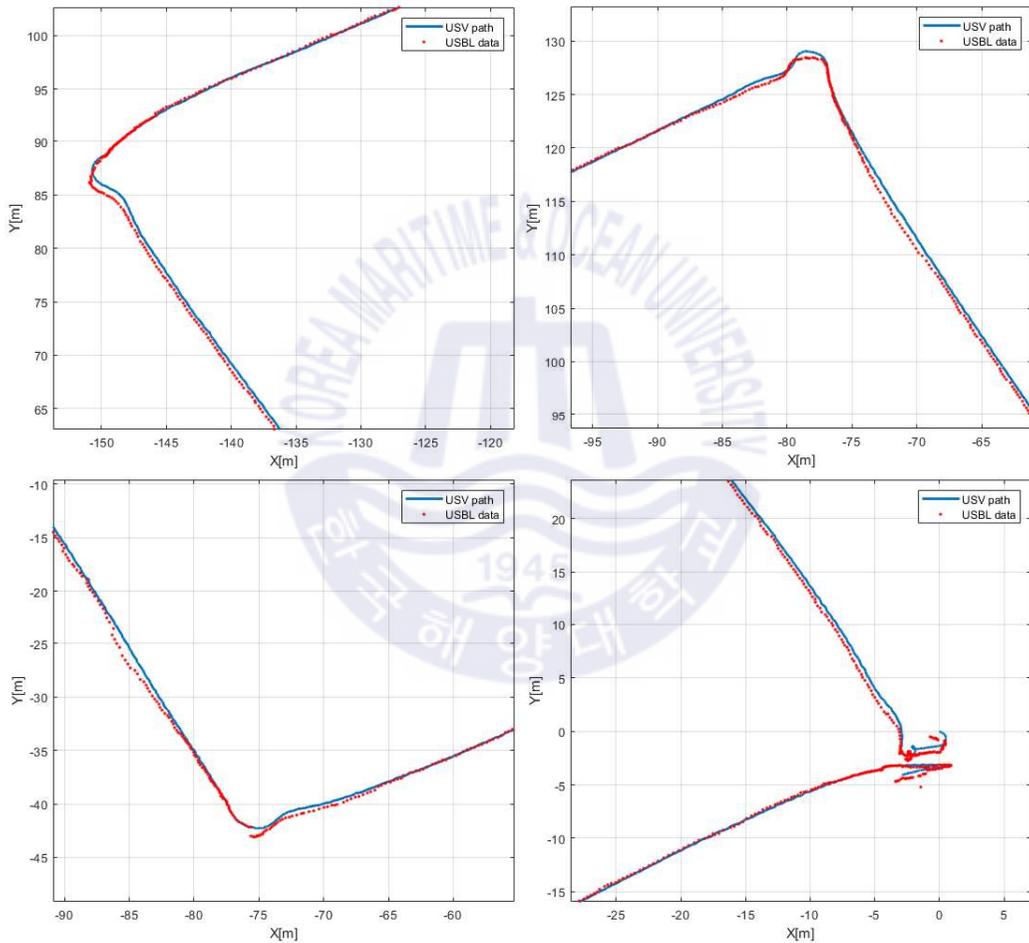


Fig. 5.23 USV path and USBL data

Table 5.4에 나타난 총 4개의 경유점 인근에서의 USV 경로와 USBL 데이터로 유추한 잠수정의 경로를 동시에 시각화 한 결과, 선회 직후 USV와 UUV 경로 간에

차이가 조금 발생하지만 이내 USV와 UUV의 경로가 일치함을 확인할 수 있다.

경로 추종 제어를 수행하는 동안 UUV에 탑재된 측면주사음향측심기를 이용해 데이터를 취득했다. 취득한 데이터는 수로 조사, 해저지형탐사 전문 기업인 마린리서치(주)에서 분석하여 페타이어, 닛 끌림 자국, 사석 노출 지역 등을 식별하였고 그 결과는 Fig. 5.24에 나타내었다.

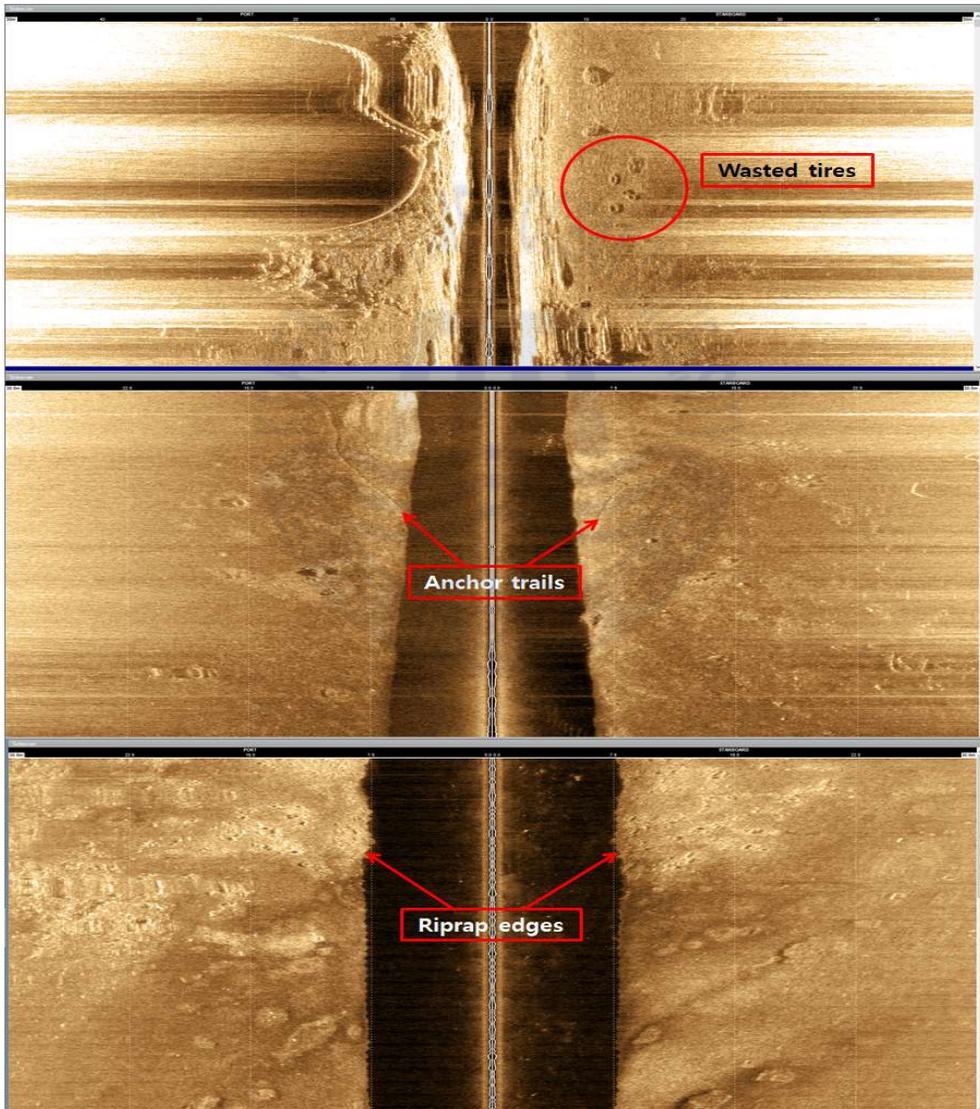


Fig. 5.24 Acquired side scan sonar data while way point tracking

## 6장. 결론

본 연구에서는 기존의 해양 플랫폼들 중 USV, ROV, 수중예인체의 장점을 더한 연안 탐사용 수상-수중의 복합형 플랫폼의 개발과 제어 시스템을 설계하였으며 경로 추종과 동적 위치 제어를 위한 알고리즘을 개발하여 시뮬레이션과 실험을 통해 그 성능 확인하였다.

복합 플랫폼은 USV, UUV, 운용 콘솔로 구성되며 UUV는 수중 케이블로 USV에 부착되어 예인체로서의 역할과 ROV의 역할을 선택적으로 수행할 수 있도록 하였다. 해안의 영향으로 조류의 방향이 빈번히 바뀌고 파도가 발생하는 등의 해양 환경이 작용하는 연안에서의 사용을 목표로 하였고 해양 환경을 이겨내기 위해 쌍동선형 수상정을 설계하였으며 예인시 저항을 최소화하기 위해 UUV는 어뢰형 형상으로 설계하였다.

전원부, 제어부를 나눠 순차적으로 설계하고 제작하였고 소나 및 다수의 영상 데이터의 실시간 수신 및 실시간 제어 명령 송신을 구현하기 위한 통신 시스템을 제작하였다. USV는 전체 플랫폼의 전원, 통신의 허브로써 역할을 하도록 설계되었고 UUV는 수중 카메라와 소나데이터를 처리하고 전송하는데 초점을 맞추었다. USV는 후미의 2개의 주 추진기로 제어되며 UUV는 일반적인 예인체가 가질 수 있는 자세 오차와 선박과의 거리 오차를 능동적으로 보상하기 위해 4개의 수중 추진기를 부착하였다.

USV는 경유점 추종 제어나 지정 좌표를 환경 영향에도 유지하는 동적 위치 제어를 수행한다. USV는 목표 지점을 향한 거리 오차와 방향각 오차에 대한 각각의 제어를 가지며 목표점과의 거리, 방향각 오차의 크기 등의 조건에 따라 각각의 제어기의 출력에 가중치를 다르게 부여하는 Weight scheduling 방법을 사용하여 제어한다. UUV는 예인 시 USV와의 경로 오차를 줄이기 위해 USV와의 상대 방향각 제어, 상대 거리 제어를 경우에 맞춰 선택하여 사용할 수 있도록 하였다.

실제 실험하기 전 복합 플랫폼의 동역학 모델링을 수행하였고 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하면서 플랫폼의 거동, 제어기의 성능을 확인하였다. 실제 플랫폼에

탑재되는 센서 중 USBL, AHRS는 잠수정의 위치, 방향각 데이터를 제공하는데 제어 성능의 확보, 취득한 센서 데이터의 유효성 검증을 위하여 개별 실험을 통해 센서 측정값의 신뢰도를 판단하였다.

마지막으로 실험역 실험을 수행하면서 플랫폼의 핵심 성능들을 확인하였고 구성된 제어 시스템과 제어기의 성능을 확인하였다. USV UUV 간의 상대 거리 제어 결과 UUV가 USV에서 5m 이내에 위치를 유지함을 확인하였다. USV의 DP 실험의 결과, 20분간 DP 지점을 중심으로 3m이내에서 위치를 유지할 수 있음을 확인하였고 경유점 제어의 결과, 4개의 임의의 경유점을 추종하는 동안 플랫폼의 이동 경로가 주어진 경로에서 오차 4m 이내인 우수한 성능을 확인하였다.



## 부록 A 동역학 모델링 및 시뮬레이션

### A.1 동역학 모델링

복합 플랫폼의 UUV는 목표 지점에서 USV를 정지시키고 윈치를 사용하여 수중케이블을 조출하고 추진기를 사용해 목표 대상에 접근하여 수중카메라로 영상 수신 가능하다. 하지만 수중카메라를 사용하는 경우를 제외하고 플랫폼의 운동은 USV를 기준으로 진행되고 플랫폼의 핵심 제어 기능이 USV를 기준으로 하므로 USV를 중심으로 동역학 모델링을 수행하였다. 모델링 후 실험 전 복합 플랫폼의 직선, 선회 운동의 특성을 파악하고 경로추적, 동적 위치제어의 성능을 파악하기 위해 운동방정식을 전개하고 이를 이용하여 동역학 시뮬레이션을 수행했다.

#### A.1.1 기구학

수상, 수중의 3차원 공간에서의 플랫폼의 운동방정식을 유도하기 위해서 진북(geodetic north)을 기준으로 한 기준좌표계인 지구고정좌표계(Earth-fixed coordinate system)와 USV의 무게중심에 고정된 선체고정좌표계(Body-fixed coordinate system)를 정의하는 것이 편하다. 지구고정좌표계는 위도(Latitude)의 양의 방향을  $X_{Earth}$  축의 양의 방향으로, 경도(Longitude)의 양의 방향을  $Y_{Earth}$  축의 양의 방향으로, 수심 방향으로  $Z_{Earth}$  축의 양의 방향을 가지는 오른손 좌표계로 설정한다. 선체고정좌표계는 USV의 선수방향을  $X_{USV}$ 의 양의 방향으로, USV의 우현 방향을  $Y_{USV}$ 의 양의 방향으로, 수심 방향으로  $Z_{USV}$  축의 양의 방향을 가지는 오른손 좌표계로 설정한다. 선체고정좌표계의 각 축에 대한 병진운동(Translational motion)을 표현하는 선속도와 위치, 각 축에 대한 회전운동(Rotational motion)을 표현하는 각속도와 각도 뿐만 아니라 작용하는 힘과 모멘트를 SNAME 표기법에 따라 Table A.1과 같이 정의하였다 [13].

지구고정좌표계에 대한 선체고정좌표계의 상대적인 운동을 표현함으로써 운동방

정식을 유도할 수 있으며 선체고정좌표계와 지구고정좌표계에서 표현된 각각의 운동변수들은 회전행렬을 통해 서로 변환이 가능하다. 본 논문에서는 지리좌표계 (Geographic coordinate system) 중 NED(North East Down)좌표계를 통해 USV의 운동을 표현한다. NED 좌표계는 주로 지면좌표계로 사용되어 운동체가 비행하는 순간 지면좌표와 운동체 좌표로 분리되지만, USV는 해수면의 고도보다 높게 올라가는 경우가 없으며 축의 정의가 직관적이고 Cartesian이라는 점에 NED 좌표계를 차용해 USV의 운동을 표현한다. 지구고정좌표계를 기준으로 한 운동변수들의 표현과 선체고정좌표계를 기준으로 한 운동변수들의 표현은 회전행렬로 상호 변환이 가능하다.

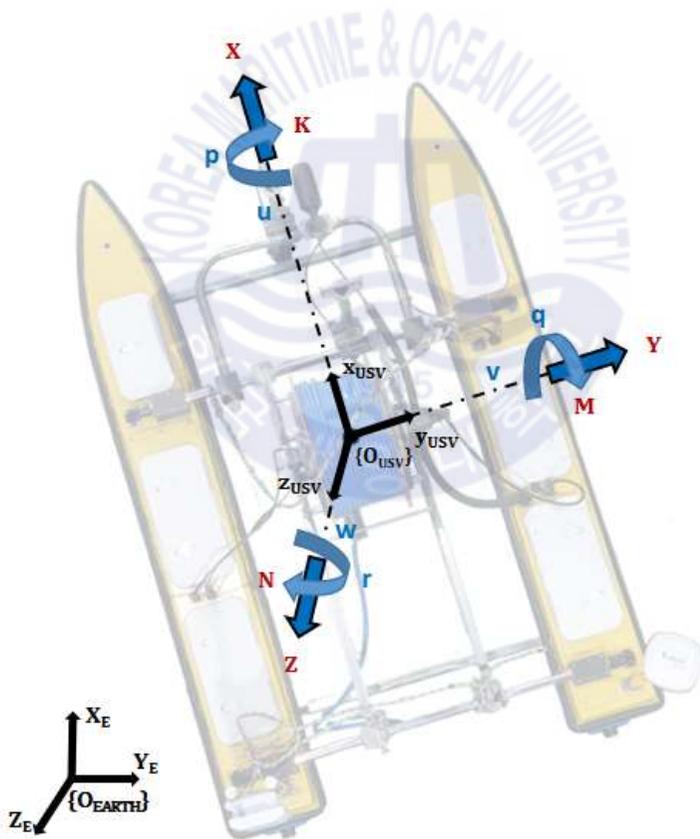


Fig. A.1 Earth-fixed and body-fixed coordinate system

Table A.1 Notation of SNAME for marine vehicles

Translational motion	Force	Linear Velocity	Position
Surge	$X$	$x$	$u$
Sway	$Y$	$y$	$v$
Heave	$Z$	$z$	$w$
Rotational motion	Moment	Angular Velocity	Euler Angle
Roll	$K$	$\phi$	$p$
Pitch	$M$	$\theta$	$q$
Yaw	$N$	$\psi$	$r$

일반적으로 6자유도를 가지는 물체의 기구학 표현은 식 (A.1) 에 나타내었듯 벡터 형태로 표현이 가능하다.

$$\dot{\eta} = J_{\theta}(\eta)\nu \quad (A.1)$$

식 A.1에서  $\eta$ 는 지구고정좌표계의 관점에서 표현한 플랫폼의 위치, 자세를 나타내는 벡터이고  $J_{\theta}$ 는 지구고정좌표계와 선체고정좌표계 사이의 변환행렬을 나타낸다. 우변의  $\nu$ 는 선체고정좌표계의 관점에서 표현한 플랫폼의 선속도와 각속도를 나타내는 벡터이다. 식 (A.2)는 식 (A.1)을 전개한 형태로 각 요소의 의미는 Table A.2에 나타내었다. 첨자 n과 b는 각각 지구고정좌표계와 선체고정좌표계를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_{b/n}^n \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_{nb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^n(\boldsymbol{\theta}_{nb}) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}_{nb}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{b/n}^b \\ \boldsymbol{\omega}_{b/n}^b \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Table A.2 Vectorial notations used to express transformation matrix

Notations	Descriptions
$\mathbf{p}_{b/n}^n = \begin{bmatrix} N \\ E \\ D \end{bmatrix}$	지구고정좌표계의 관점에서 NED 좌표형태로 표현한 선체의 위치 Body-fixed position of {b} with respect to {e} expressed in {n}
$\boldsymbol{\theta}_{nb} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$	지구고정좌표계의 관점에서 선체고정좌표계와 사이의 오일러 각 Euler angles between {n} and {b}
$\mathbf{v}_{b/n}^b = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$	선체고정좌표계로 표현한 지구고정좌표계에 대한 선체의 선속도 Linear velocity of the point $\mathbf{O}_b$ with respect to {n} expressed in {b}
$\boldsymbol{\omega}_{b/n}^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$	선체고정좌표계로 표현한 지구고정좌표계에 대한 선체의 각속도 Angular velocity of {b} with respect to {n} expressed in {b}

두 좌표계 간 변환행렬  $\mathbf{J}_{\boldsymbol{\theta}}$ 는 선속도에 대한 변환행렬  $\mathbf{R}_b^n$ 과 각속도에 대한 변환행렬  $\mathbf{T}_{\boldsymbol{\theta}}$ 로 구성된다. 선체고정좌표계에서 측정된 선속도  $\mathbf{v}_{b/n}^b$ 를 NED 좌표계에서의 선속도  $\dot{\mathbf{p}}_{b/n}^n$ 로 변환하기 위한 변환행렬  $\mathbf{R}_b^n$ 은 식 (A.3)과 같이 오일러 각을 통해 표현된다.

$$\mathbf{R}_b^n(\boldsymbol{\theta}_{nb}) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

또한 선체고정좌표계에서 측정된 각속도  $\omega_{b/n}^b$  를 NED 좌표계에서의 각속도  $\dot{\Theta}_{nb}$  로 변환하기 위한 변환행렬  $T_{\Theta}$  은 식 (A.4)로 나타낼 수 있다[14].

$$T_{\Theta}(\Theta_{nb}) = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta \sin \phi & \tan \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

식 (A.4)의 행렬에서  $\theta = \pm 90^\circ$  일 때 변환행렬  $T_{\Theta}$  은 특이점을 갖게 되어 변환할 수 없게 된다. 하지만 본 논문에서 고려하는 플랫폼의 특성상 수상 및 수중 운항 시 피치각( $\theta$ )이  $\pm 90^\circ$  가 되는 경우는 일어나지 않으므로 위의 식 (A.4)의 변환행렬을 사용할 수 있다.[15]

### A.1.2 강체 동역학

수상 운동체(e.g. 선박, USV)의 유도는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 대표적인 예로 Fossen은 파도의 영향이 없는 환경에서 6자유도 비선형 선박 모델의 움직임을 묘사하는 Maneuvering 과 파도, 해류의 영향을 고려하고 정지상태에서의 외부 영향을 고려하는 Seakeeping 모델을 제안했다[14]. Woolsey는 균일하지 않은 흐름장에서의 강체의 움직임을 묘사하는 역학 모델을 제안했다[16]. 또한 방향타 제어만 사용하여 항로 유지와 roll 감폭(Damping)을 가능하게 하는 모델이 연구되고, 그 외 Nomoto, 의 선박 조향 모델, Abkowitz, 1964 의 축소된 테일러 급수(Taylor series) 비선형 모델 등 다양한 선행 연구들이 진행되어왔다[17].

본 논문에서는 Fossen의 표기법 운동방정식을 기반으로 동역학 모델을 전개하였으나 몇 가지 가정을 두어 간략화된 형태의 모델을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다.

동역학 모델의 대상인 USV는 부력을 가지는 선체로, 부력중심과 무게중심이 별도로 존재하지만 본 연구에선 유도의 편의상 부력중심과 무게중심이 일치한다고 가정

한다. 또한 대상 플랫폼을 강체로 가정하고 뉴턴의 제 2법칙을 적용하여 선체고정 좌표계에 대해 표현한 3자유도 병진운동과 3자유도 회전운동을 나타내는 운동방정식을 유도하면 식 (A.5)와 식 (A.6)처럼 표현할 수 있다.

$$m[\dot{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_G + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_G)] = \mathbf{f}_0 \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{I}_0 \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_0 \boldsymbol{\omega} + m \mathbf{r}_G \times (\dot{\mathbf{v}}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_0) = \mathbf{m}_0 \quad (\text{A.6})$$

여기서  $m$ 은 대상 플랫폼의 질량  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $\mathbf{v}$ 는 Table A.2에 나타내었다.  $\mathbf{r}_G$ 는 선체고정 좌표계의 원점에서 강체의 무게중심 사이의 벡터이고  $\mathbf{I}_0$ 는 선체고정좌표계 원점에 대해 표현된 관성행렬로 식 (A.7)과 같다.

$$\mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{I}_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Table A.2와 식 A.7을 바탕으로 식 (A.5)와 (A.6)을 전개하면 식 (4.8)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(pr + \dot{p})] &= \Sigma Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} & \\ + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= \Sigma K \end{aligned} \quad (\text{4.8})$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{v} - uq + vp)] = \Sigma M$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\ + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = \Sigma N$$

위의 정리된 식들을 행렬, 벡터의 형태로 표현하면 식 (A.9) 의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (\text{A.9})$$

이 식은 강체로 가정한 선체에 관한 요소들로 여기서 RB는 강체(Rigid body)를 나타낸다.  $\mathbf{M}_{RB}$ 은 시스템의 질량(Mass)과 관성(Inertial)행렬,  $\mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu})$ 는 코리올리(Coriolis)힘과 구심력(centripetal) 성분이 포함된 행렬,  $\boldsymbol{\tau}_{RB}$ 는 시스템에 가해지는 추진기에 의한 외력(힘, 모멘트)을 나타낸다[ ].

일반적으로 USV이나 반 잠수정은 수평면을 따라 운동하게 되며 Surge, Sway, Yaw로 표현할 수 있다. 따라서 상태 벡터는  $\boldsymbol{\nu} = [u, v, r]^T$   $\boldsymbol{\eta} = [N, E, \psi]^T$  으로 나타낼 수 있다. 또한 선체의 질량 분포는 균일하다고 가정하고 xz평면에 대하여 대칭한다고 가정하면  $I_{xy} = I_{yz} = 0$  가 되고 선체의 길이방향 중심선에 선체고정좌표계를 놓음으로써  $y_G = 0$ 으로 두면 식 (A.8)은 식 (A.10)의 형태로 간소화 된다[14].

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_Z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_G r \\ mr & 0 & 0 \\ mx_G r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

본 연구에서 플랫폼에 가해지는 힘과 모멘트는 좌, 우측 선체의 길이 방향으로 추력을 발생시키는 2개의 추진기로 가해지며 추력 방향을 바꿀 수 있는 추진기가 아니며 별도의 방향타를 부착하지 않았다. 따라서 제어력과 제어 모멘트는 수식 (A.11)과 같이 표현되고 B는 좌측선체의 추진기( $T_{port}$ )와 우측선체의 추진기( $T_{stbd}$ )사이 거리에 해당한다.

$$\begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{port} + T_{stbd} \\ 0 \\ (T_{port} - T_{stbd})B/2 \end{bmatrix} \quad (A.11)$$

USV의 추진기는 DWTEK社의 DWT6532 추진기를 사용하였고 추진기 제조사에서 제공한 상용 프로그램을 통해 실험과 제조사에서 제공한 데이터를 바탕으로 추력곡선을 구하였다. 추진기에 입력되는 명령의 범위는 -7000 ~ 7000 RPM 이나 추진기의 축은 -1000 ~ 1000 RPM으로 회전함을 회전속도계를 통해 확인하였다. 0 ~ 1000 RPM 구간을 CW로 -1000 ~ 0 RPM 구간을 CCW로 구분하여 추진기의 추력 곡선을 구하였고 그 결과를 Fig. A.2와 Fig. A.3에 나타내었다.

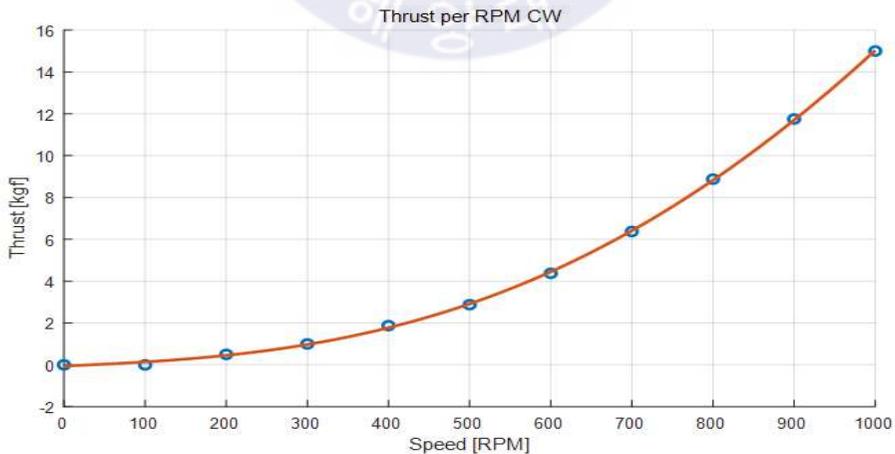


Fig. A.2 Thrust curve between CW direction rpm and thrust

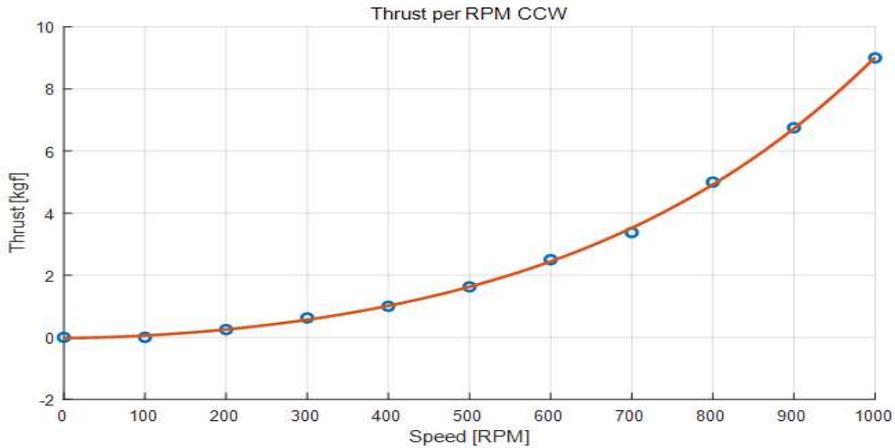


Fig. A.3 Thrust curve between CCW direction rpm and thrust

추력 곡선은 100 RPM 씩 증가시키며 추력을 측정된 데이터를 바탕으로 구하였고 CW 방향 최대 추력은 15.15 kgf CCW 방향 최대 추력은 9.05 kgf이다. 취득한 데이터를 바탕으로 4차 다항식으로 표현하면 입력 전압과 추력간의 관계를 식 (A.12)와 식 (A.13)과 같이 표현할 수 있다.

### A.1.3 유체력

플랫폼이 수상, 수중에서 운동할 때 유체와 접촉하는 형상에 따라 플랫폼의 속도, 가속도와 같은 운동 상태에 대한 유체로부터의 다양한 형태의 힘과 모멘트가 발생한다. 이처럼 유체에 의해 플랫폼에 가해지는 힘과 모멘트를 유체력 이라 하며 크게 4가지 요소로 분류할 수 있고 식 (A.14)처럼 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_A \dot{\boldsymbol{\nu}}, \mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}, \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}, \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \quad (\text{A.14})$$

여기서,  $\mathbf{M}_A$ 은 부가질량(Added mass)에 의한 관성(Inertial)행렬,  $\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu})$ 는 부가질량으로 인한 코리올리(Coriolis)힘과 구심력(Centripetal)을 나타낸다.  $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ 는 감쇠

(Damping)행렬로 파도, 표면마찰, 유체의 원운동, 와류로 인한 영향을 포함한다.  $g(\eta)$ 는 중력과 부력(Gravitational and buoyancy)에 의한 복원력과 복원모멘트 벡터이다.

앞서 A.1.2절에 강제동역학을 유도하며 가정했듯이 대상 플랫폼의 형상이 대칭면을 가진다고 하고, 플랫폼을 저속으로 운항한다고 하면 수상 부가질량에 의한 유체력 행렬을 대칭행렬의 형태로 정리가 가능하며 마찬가지로 부가질량에 의한 코리올리, 구심력 행렬을 정리한다. 정리된 행렬을 USV의 거동에서 Roll, Pitch, Heave의 영향은 아주 작다고 가정하고 Surge, Sway, Yaw 3개의 힘과 모멘트에 대해 표현하면 식 (A.15)와 같이 단순화시켜 표현할 수 있다[18].

$$M_A = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}; C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v_r r + Y_r r \\ 0 & 0 & -X_u u_r \\ -Y_v v_r - Y_r r & X_u u_r & 0 \end{bmatrix} \quad (A.15)$$

$D(\nu)$ 로 표현되는 감쇠행렬은 유체와 플랫폼 간의 상대속도에 의존하는 유체감쇠력을 포함하는데 많은 경험적, 실험적인 데이터 없이 대부분 비선형적인 연성관계를 띄는 유체력 계수를 구하는 것은 한계가 있다. [19] 따라서 선체가 전후, 좌우 대칭이고 고차수의 항들의 영향은 작다고 가정하여 2차 이상의 유체감쇠력 성분들을 무시하였다. 이러한 가정을 통해 식 (A.16)와 (A.17)와 같이 감쇠력을 선형유체감쇠력과 비선형유체감쇠력으로 나타낼 수 있다.

$$D(\nu) = D_l \nu + D_{nl}(\nu) \nu \quad (A.16)$$

$$D_l = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}; D_{nl} = \begin{bmatrix} -X_u |u| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v |v| & -Y_r |r| \\ 0 & -N_v |v| & -N_r |r| \end{bmatrix} \quad (A.17)$$

$D_l$ ,  $D_{nl}$ 는 각각 선형유체감쇠력과 비선형유체감쇠력을 나타낸다.

마지막으로  $g(\eta)$  행렬은 부력중심과 무게중심이 일치한다는 가정으로 영향을 크게 줄일 수 있으며 쌍동선의 선체 구조상 USV의 주요 힘인 Surge, Sway, Yaw에는 구조적으로 크게 영향을 미치지 못 하므로 영향을 고려하지 않는다[20].

강체의 관성행렬과 코리올리행렬을 부가질량에 의해 생성된 관성행렬과 코리올리행렬을 더하고 감쇠 행렬과 복원력 벡터를 모두 더해 식 (A.14) 형태로 정리하면 식 (A.18)로 정리할 수 있다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + \tau_E \quad (A.18)$$

성분이 포함된 행렬을 나타낸다.  $D$ 는 감쇠(Damping)행렬,  $g$ 는 중력과 부력(Gravitational and buoyancy)에 의한 복원력과 복원모멘트 벡터를 나타내고, 우변의  $\tau_E$ 는 풍하중, 조류하중 등의 외부 환경에서 작용하는 힘과 모멘트 벡터이다. 식 (A.18)의 좌변 성분들을 전부 더해 표현하면 식 (A.19)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (m - X_u)\dot{u} - mvr + (Y_v v_r r + Y_r r - mx_G r) - (X_u + X_{u|u}|u|)u &= \tau_X \\ (m - Y_v)\dot{v} + (mx_G - Y_r)\dot{r} + mur - X_u u_r r - (Y_v + Y_{v|v}|v|)v \\ - (Y_r + Y_{r|r}|r|)r &= \tau_Y \\ (mx_G - N_v)\dot{v} + (I_Z - N_r)\dot{r} - (Y_v v_r r - Y_r r + mx_G r)u + X_u u_r v \\ - (N_v + N_{v|v}|v|)v - (N_r + N_{r|r}|r|)r &= \tau_N \end{aligned} \quad (A.19)$$

#### A.1.4 환경 하중

식 (A.16)에서 우변의  $\tau_E$ 는 환경하중을 뜻하고 주로 풍하중, 조류하중, 파랑하중

을 포함한다. 본 연구에서는 동일 해상상태에서 USV에 미치는 영향이 지배적인 풍하중과 조류하중을 고려하며 하중으로 인해 발생하는 방향을 Fig A.4에서처럼 각각  $\psi_w, \psi_c$ 으로 나타내고 그 속력을 각각  $V_w, V_c$ 로 표기한다.

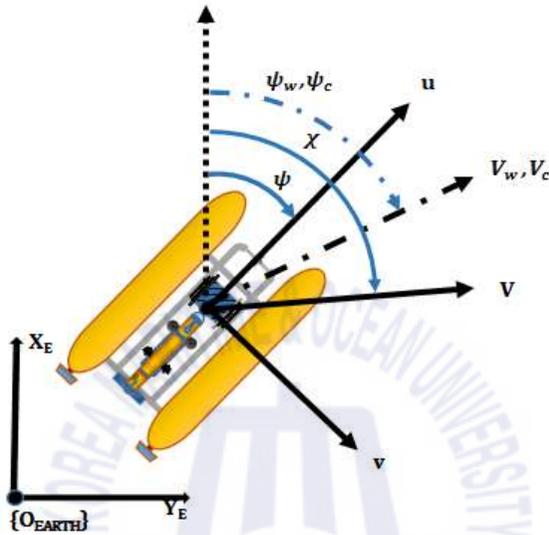


Fig. A.4 Coordinates and representation for environmental forces

### 풍 하중

풍하중에 의한 힘과 모멘트를 구하기 위해 선체에 대한 상대속도와 상대각도를 알아야 한다. Fig. A.4처럼 지구고정좌표계에서 풍하중의 방향이 정의되면 선체에 작용하는 바람의 상대속도는 식 (A.20)처럼 정리할 수 있다.

$$u_{rel} = V_w \cos(\psi_w - \psi) + u \tag{A.20}$$

$$v_{rel} = V_w \sin(\psi_w - \psi) + v$$

이를 통해 상대속도의 전속도, 바람의 상대속도의 각도를 식 (A.21)를 이용해 구할 수 있다. 구해진 전속도와 상대속도 각도를 통해 각 X,Y,N에 대한 힘과 모멘트를 계산하는데 사용된다.

$$V_{rel} = \sqrt{u_{rel}^2 + v_{rel}^2} \quad (A.21)$$

$$\psi_{rel} = \tan^{-1}\left(\frac{v_{rel}}{u_{rel}}\right)$$

선박에 대한 풍하중 모델은 Fossen의 풍하중 모델을 사용하며 플랫폼에 작용하는 풍하중의 힘과 모멘트는 식 (A.22)처럼 나타낼 수 있다[14].

$$\begin{bmatrix} X_{wind} \\ N_{wind} \\ Y_{wind} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} C_X(\psi_{rel}) \rho_a V_{rel}^2 A_F \\ \frac{1}{2} C_Y(\psi_{rel}) \rho_a V_{rel}^2 A_L \\ \frac{1}{2} C_N(\psi_{rel}) \rho_a V_{rel}^2 A_L L \end{bmatrix} \quad (A.22)$$

이때  $\rho_a$ 는 공기의 밀도를 나타내고  $C_X(\psi_{rel})$ ,  $C_Y(\psi_{rel})$ ,  $C_N(\psi_{rel})$ 은 각각 풍하중 계수를 나타낸다. 일반적으로 풍하중 계수는 풍동시험을 통해 구하지만 복합 플랫폼은 풍동시험을 수행하지 못하였으므로 Fossen이 제안한 방법인 식 (A.23)을 이용하여 근사치를 구하였다[14].

$$C_X(\psi_{rel}) = -c_x \cos(\psi_{rel})$$

$$C_Y(\psi_{rel}) = c_y \sin(\psi_{rel}) \quad (A.23)$$

$$C_N(\psi_{rel}) = c_z \sin(2\psi_{rel})$$

Fossen에 의하면  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$ 는 각각 식 (A.24)에 나타낸 집합에 속한다[14].

$$c_x \in (0.50, 0.90) , c_y \in (0.70, 0.95) , c_z \in (0.05, 0.20) \quad (A.24)$$

$A_F$ ,  $A_L$ 는 각각 전투영면적(Frontal projected area)과 측투영면적(Lateral projected area)을 나타낸다. 복합플랫폼의 전, 측방 투영 면적은 설계도면을 기반으로 계산하였다. 측정된 면적은  $A_F (m^2) = A_L (m^2) =$  이다.

본 연구에서 풍하중을 계산할 때 바람의 세기를 Table A.3을 이용하여 결정하였다[21].

**Table A.3** Beaufort numbers and their corresponding wind speeds

Beaufort number	Wind speed (knots)	Mean value (knots)	Description of wind	State of sea
0	< 1	0	Calm	Calm
1	1 ~ 3	2	Light air	Calm
2	4 ~ 6	5	Light breeze	Smooth
3	7 ~ 10	9	Gentle breeze	Smooth
4	11 ~ 16	13	Moderate breeze	Slight
5	17 ~ 21	19	Fresh breeze	Moderate
6	22 ~ 27	24	String breeze	Rough
7	28 ~ 33	30	Moderate breeze	Very rough
8	34 ~ 40	37	Fresh gale	High
9	41 ~ 47	44	Strong gale	Very high
10	48 ~ 55	52	Storm	Very high
11	56 ~ 63	60	Violent storm	Phenomenal
12	< 64	-	Hurricane	Phenomenal

Table A.3은 Beaufort number에 따른 풍속의 범위와 각 경우에 해당하는 해상상태 값을 Pierson-Moskowitz 스펙트럼의 해상 상태 표를 기반으로 정리한 것이다.

### 조류 하중

조석 간만의 차, 해수온도 차, 바람 등의 영향으로 해양에서는 예상하기 힘든 복잡한 해수의 흐름이 발생하며 이로 인한 외력을 수학적으로 정확히 모델링하는 것은 어려운 작업이다. 따라서 Fossen이 제안한 2차원, 비회전성(Irrotational)의 조류모델을 이용하여 플랫폼에 작용하는 영향을 고려했다. 조류모델은 조류하중으로 인해 발생한 속도  $V_c$ 를 NED고정좌표계에 대해 표현한 조류속도로 변환함으로써 구할 수 있고 식 (A.25)과 같이 표현 가능하다. 수심방향으로의 속도는 고려하지 않는 2차원의 모델이므로 고정좌표계에 대해 표현한 조류속도  $v_c^n$ 는 식 (A.26)으로 나타낼 수 있다[14].

$$V_c = \begin{bmatrix} V_c \cos(\psi_c) \\ V_c \sin(\psi_c) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.25)$$

$$u_c = V_c \cos(\psi_c - \psi) \quad v_c = V_c \sin(\psi_c - \psi) \quad V_c = \sqrt{u_c^2 + v_c^2} \quad (A.26)$$

본 연구에서는 조류의 영향에 의한 힘과 모멘트를 직접 운동방정식에 적용하는 대신 조류로 인한 상대속도를 구하여 기존에 유도한 운동방정식에 대치시키는 방법을 사용했다.

## A.4 동역학 시뮬레이션

A.1절에서 유도한 동역학 방정식과 외력으로 고려되는 추진기 추력, 조류의 영향을 확인하고 제어기의 성능을 확인하기 위해 Matlab과 Simulink를 사용해 시뮬레이

션을 수행하였고 미분방정식의 수치해석을 위한 방법으로 Runge-Kutta 4차 방법을 사용하였다[22]. 수행한 시뮬레이션의 구성은 아래 Fig. A.5와 같다.

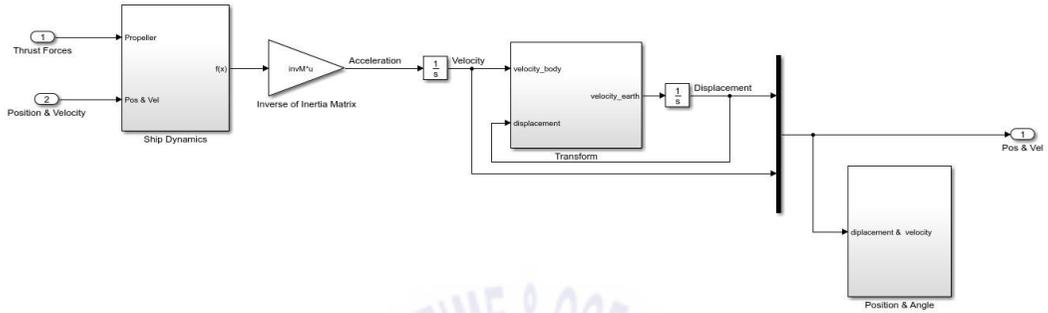


Fig. A.5 Structure of simulation program

Fig. A.6은 USV에 외란을 포함한 직선, 회전 운동에 대한 시뮬레이션 결과이다. 외란은  $0^\circ$  방향에서 1m/s의 바람을 가하여 수행하였다. 좌측의 그래프는 직선 운동의 결과를, 우측의 그래프는 1회 선회 운동의 결과이다.

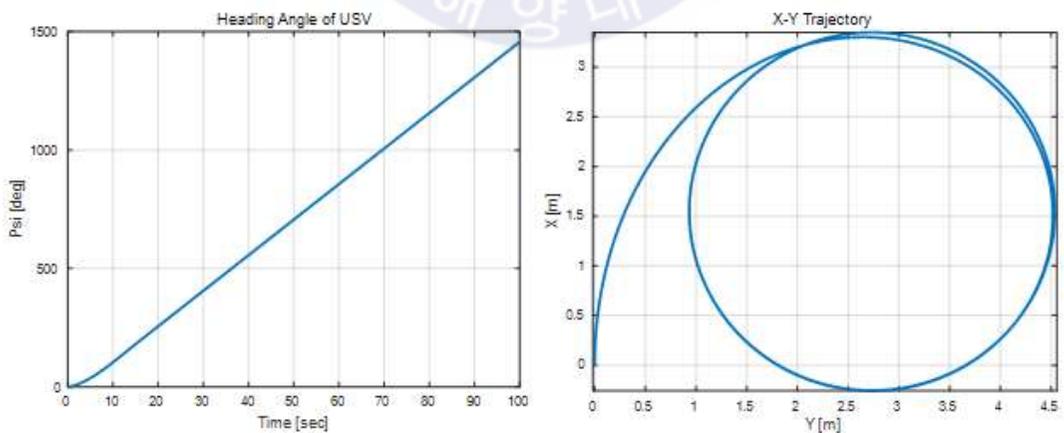


Fig. A.6 Surge motion and turning motion simulation result

Fig. A.7은 Fig. A.6에서와 동일한 외란 조건에서 선회 운동을 반복적으로 수행한 결과와 풍하중의 변화를 나타낸 결과이다. 0

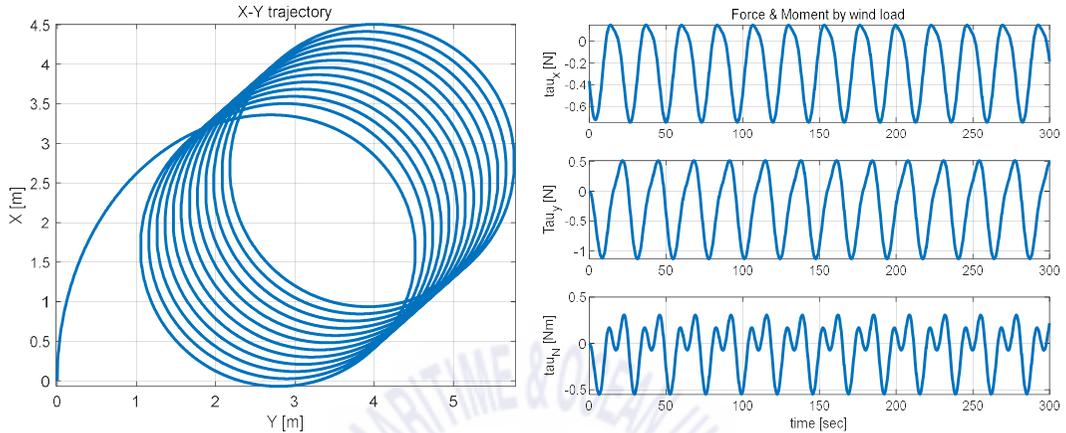


Fig. A.7 Turning motion and wind driven forces

Fig. A.8의 상단은 4장에 나타난 USV의 제어를 수행하기 위한 Heading control과 Tracking control의 반복으로 시뮬레이션을 수행한 경유점 추종 제어의 결과이다. 경유점은 총 4개를 입력하였으며 5.2.6에 나타난 실험에서의 사용했던 경유점 간의 거리와 유사하다. 4개의 좌표는 각각 (0, 0), (150, 0), (150, 90), (0, 90)이고 Fig. A.8의 하단은 추종 과정에서의 방향각의 변화를 나타낸다. Fig. A.8에서 다홍색의 실선은 외란이 없는 상태에서의 경로를 나타내고 청색 실선은 외란이 가해졌을 때 플랫폼의 경로를 나타낸다.

유도된 동역학 모델에서 필요한 유체력 계수들과 파라미터들은 기존에 연구된 결과들을 참고하였다[22]-[24].

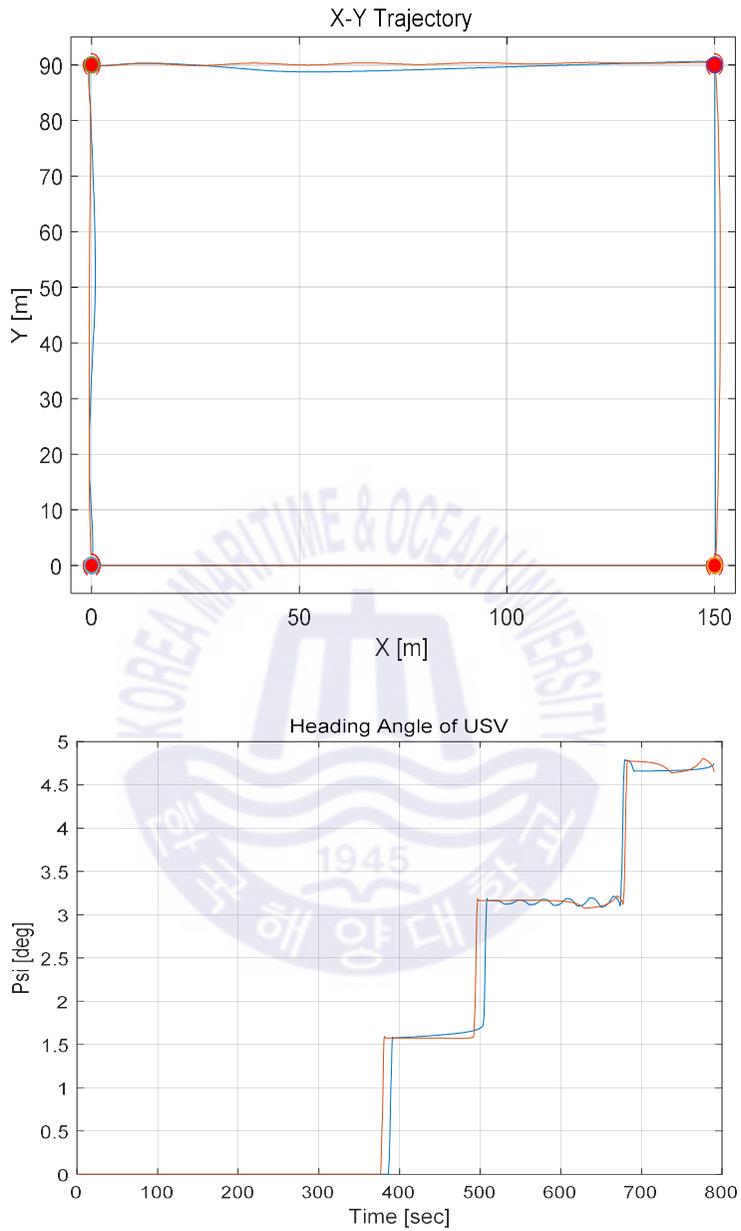


Fig. A.8 Simulation result of way point tracking

## 부록 B 제어 구성품 및 회로

### B.1 하드웨어 부품



Fig. B.1 Battery of USV

Table B.1 Specifications of USV battery

Size	L660 X W85 X H175 (mm)
Weight	13 (kg)
Case	Aluminum(2T), Waterproof, Seawater resistant
Voltage	25.9V (SOC 0-100% : 19.6V ~ 29.4V)
Current	Nominal < 50A, (Peak 60A < 1.5sec)
Protection	Over charge, discharge, current, heat protection Cell balancing, Short protection



Fig. B.2 Winch BLDC motor and motor driver

Table B.2 Specifications of Winch BLDC motor

Size	L114 x W90 x H90 (mm)
Rated Power	300 W
Applied Voltage	24 V DC
Rated Speed	2000 RPM
Poles	4
Rated Torque	1.43 N-m

Table B.3 Specific details of Winch motor driver

Size	L164 x W88 x H46 (mm)
Input Voltage	DC 24 ~ 48V( $\pm 10\%$ )
Rated Output	750 W
Nominal Current	30 A rms
Motor Feedback	Hall Sensor
Power Consumption	Within 150 mA



**Fig. B.3** MINI PC in USV

**Table B.4** Specifications of MINI PC in USV

Size	L175 x W177 x H34 (mm)
Weight	1.3 kg
Processor	6 <sup>th</sup> gen Intel i5-6500T (4MB/cache/2.5 ~ 3.1GHz)
Memory	4GB DDR4-2400 SODIMM, expansion slot 2DIMM/max 32GB
Internal memory	128GB SATA SSD
GPU	Intel HD graphics 530
Network	10/100/1000M Ethernet
Power supply	65W external adapter



**Fig. B.4** USV front camera and rear camera

**Table B.5** Specifications of USV front camera

Size	L246 x $\phi$ 70 (mm)
Housing	Aluminum IP66
Power	12V DC ( $\pm$ 10%)
Resolution	2560 x 1440
S/N ratio	52 dB (AGC off, Weight on)
Infrared distance	4 - 7m
Image sensor	CMOS
Network interface	RJ45 10/100MB Ethernet interface

**Table B.6** Specifications of USV rear camera

Size	L48 x W41 x H35 (mm)
Housing	Plastic IP66
Power	12V DC
Resolution	1920 x 1080
Processor	1080P Hi3518 1/2.7" COMS GC2023
Infrared distance	4 - 7m
Image sensor	CMOS
Network interface	RJ45 10/100MB Ethernet interface



**Fig. B.5** UUV underwater camera

Table B.7 Specifications of UUV underwater camera

Size	L82 x $\phi$ 68 (mm)
Housing	SUS316 (Stainless steel)
Power	12V DC( $\pm$ 10%), 2A
Pixel	1920(H) x 1080(V)
S/N ratio	50 dB >
Lux	Color 0.01Lux @ F1.2
Image sensor	Color 1/2.9 CMOS SONY Sensor
Resolution	2.1 Mega pixel

## B.2 제어 보드 회로

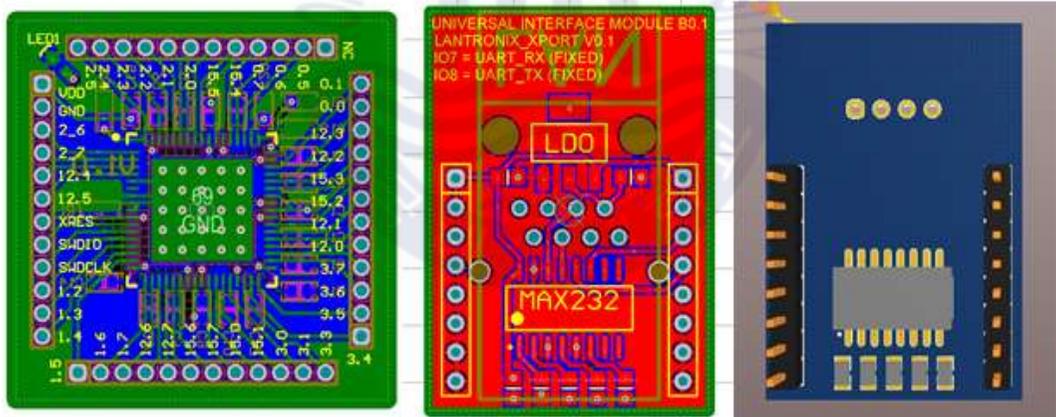


Fig. B.6 USV control board modules

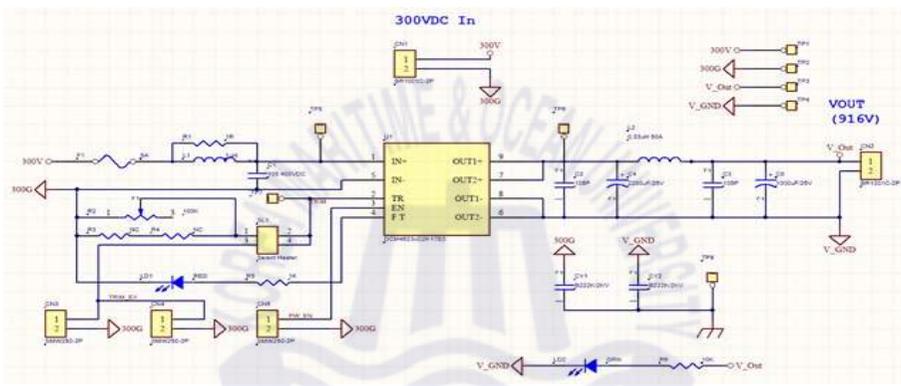
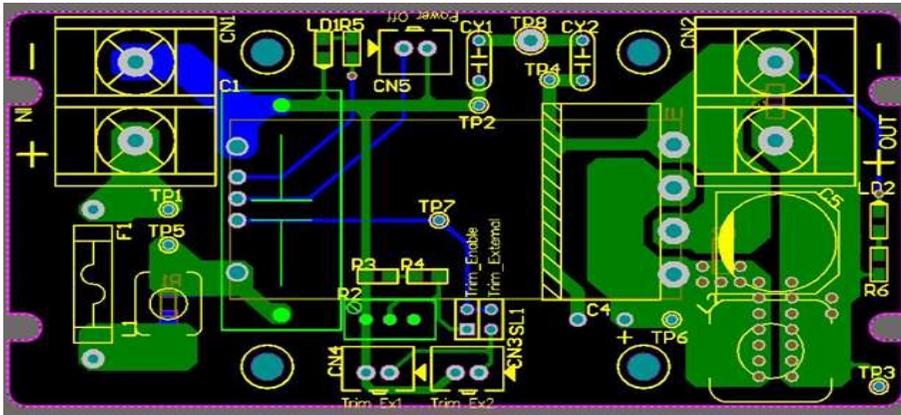


Fig. B.7 UUV power board PCB artwork and schematics

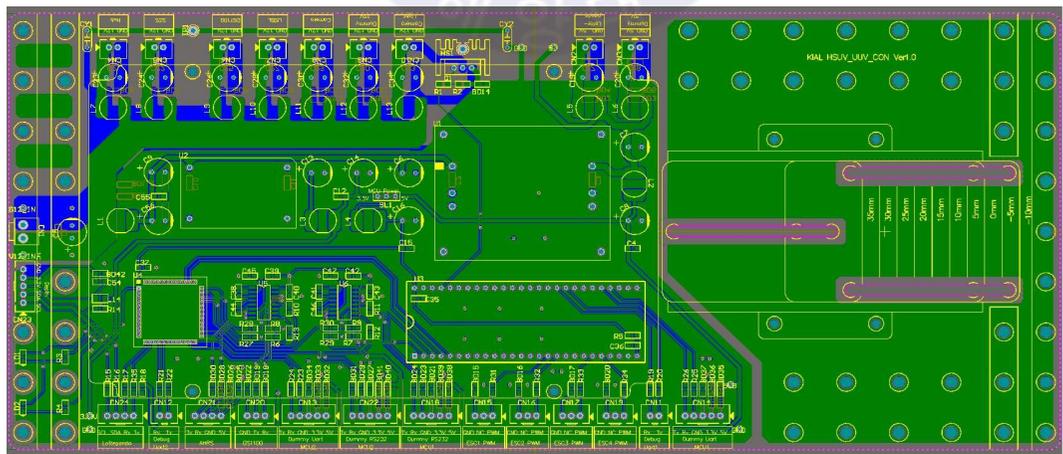


Fig. B.8 UUV control board PCB artwork

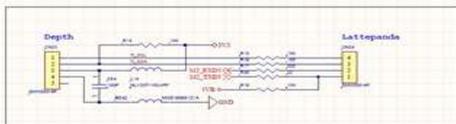
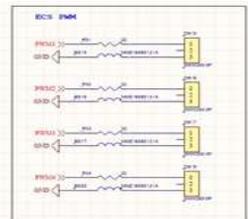
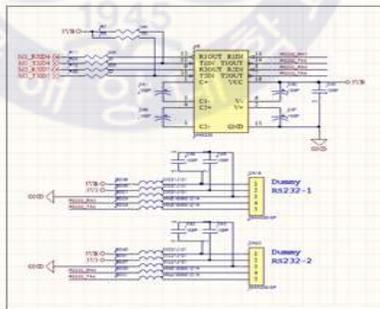
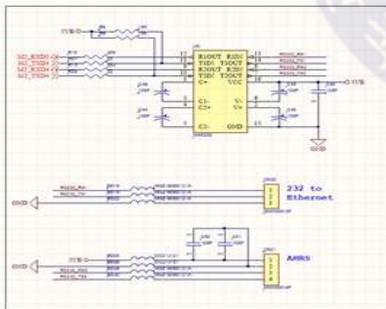
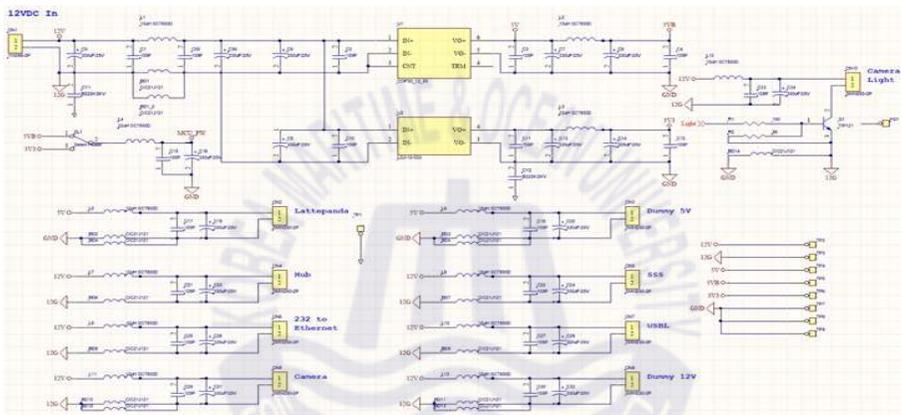
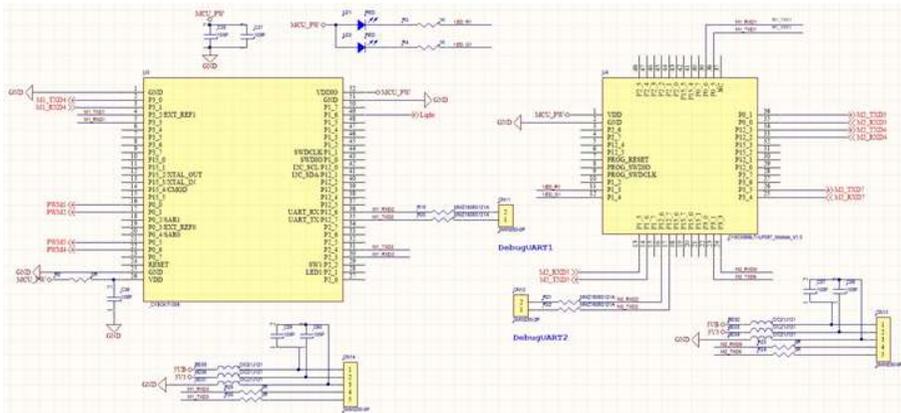


Fig. B.9 UUV control board schematics

## 참고문헌

- [1] Grand view research (GVR), Aug 2018. *Underwater Robotics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (ROV, AUV), By Application (Commercial Exploration, Defense & Security, Scientific Research), By Region, And Segment Forecasts, 2018 - 2025*. United States: GVR.
- [2] F.A. Azis, M.S.M. Aras, M.Z.A. Rashid, M.N. Othman, S.S. Abdullah, 2012, *Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study*, Procedia Engineering, Volume 41, Pages 554-560,
- [3] Manoj Sahi, 2015, *Challenges for Underwater Robots* [Online] Available at: <https://www.tractica.com/automation-robotics/challenges-for-underwater-robots> [Accessed 9 December 2019].
- [4] Maxine Major, 2013, *Underwater Vehicles Unmanned / Autonomous* [Online] Available at: <https://www.slideserve.com/tavia/underwater-vehicles-unmanned-autonomous> [Accessed 8 December 2019].
- [5] Caiti, A., Di Corato, F., Fenucci, D., Allotta, B., Costanzi, R., Monni, N., ... & Ridolfi, A. September 2014. *Experimental results with a mixed USBL/LBL system for AUV navigation*. In 2014 Underwater Communications and Networking (UComms) (pp. 1-4). IEEE.
- [6] 한국조선해양기자재연구원, Aug 2019. 수역관리를 위한 유선 무인 잠수정 탑재 가능한 무인선 개발 대전: 과학기술정보통신부 한국연구재단
- [7] Time and data.com, 2020 *Sun Graph for Busan* [Online] Available at: <https://www.timeanddate.com/sun/south-korea/busan> [Accessed 2 January 2020].
- [8] S. Moe and K. Y. Pettersen. September 2016. Set-based Line-of-Sight (LOS) path following with collision avoidance for underactuated unmanned surface vessel. In: *24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Athens, 2016, pp. 402-409. IEEE
- [9] Rundqwist, Lars. 1990, *Anti-reset windup for PID controllers*. IFAC Proceedings Volumes 23.8 (1990): pp. 453-458.
- [10] Edwards, D. B., et al. A leader-follower algorithm for multiple AUV formations. *2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles* (IEEE Cat. No. 04CH37578). 2004, IEEE.

- [11] Liang, Xinwu, et al. *Leader-following formation tracking control of mobile robots without direct position measurements*. IEEE Transactions on Automatic Control 61.12 ,2016, pp. 4131-4137.
- [12] Lee, Dong & Lee, Seong-Won. 2014. *The Implementation of a Battery Simulator with Atypical Characteristics of Batteries*. KIPS Transactions on Computer and Communication Systems. 3. 10.3745/KTCCS.2014.3.11.419. pp. 419-426.
- [13] SNAME 1950. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. In: *Technical and Research Bulletin* No. 1-5.
- [14] Thor I. Fossen, 2011, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, JOHN WILEY & SONS, Chichester, United Kingdom.
- [15] 김기훈, 2005. *무인잠수정 SNUUV I의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석*. 박사학위 논문. 서울; 서울대학교
- [16] Thomasson, P. G., & Woolsey, C. A. 2013. *Vehicle motion in currents*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 38(2), pp.226-242.
- [17] Tiano, A., & Blanke, M. 1997. *Multivariable identification of ship steering and roll motions*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 19(2), 63-77.
- [18] Thor I. Fossen, 2004, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, JOHN WILEY & SONS, Chichester, United Kingdom.
- [19] 김동희. 2016. *수중 무인잠수정-매니플레이터 시스템의 동적 안정성 향상을 위한 여유자유도 해석 및 강인제어기 설계*. 박사학위논문. 부산: 한국해양대학교
- [20] Christian R. Sonnenburg. 2012. *Modeling, Identification, and Control of an Unmanned Surface Vehicle*. Ph.D. Blacksburg, Virginia. Virginia Polytechnic Institute and State University
- [21] Das, Swarup & Talole, SE. 2015. *Effect of Environmental Disturbances on Marine Surface Vessels*. MILIT Journal. 4. pp.21-26.
- [22] Hong, Sung-Min. 2019. *A Study of Autonomous Navigation System of Unmanned Surface & Underwater Vehicle*. Ph.D. Busan: Korea Maritime and Ocean University
- [23] Li, C., Jiang, J., Duan, F., Liu, W., Wang, X., Bu, L., ... & Yang, G. 2019. *Modeling and Experimental Testing of an Unmanned Surface Vehicle with Rudderless Double Thrusters*. Sensors, 19(9), 2051.
- [24] Sarda, E. I., Qu, H., Bertaska, I. R., & von Ellenrieder, K. D. (2016). *Station-keeping control of an unmanned surface vehicle exposed to current and wind disturbances*. Ocean Engineering, 127, 305-324.

## 감사의 글

공부가 부족하다고 느껴 석사과정을 지원하고 정신없이 공부하고 일하다 보니 2년이 지나 졸업 논문에 감사의 글을 쓰는 저 자신이 신기하고 낯설게 느껴집니다. 늦게 시작한 공부에 대한 압박감과 스스로와의 싸움이 학업 그 자체보다도 더 어렵게 다가왔었지만 응원해주시고 지원해주신 많은 분들께 이렇게나마 감사의 인사를 드리게 되었습니다.

먼저, 부족함 없이 학업에 집중할 수 있는 환경을 만들어 주신 최형식 지도 교수님께 감사합니다. 교수님의 지원 덕분에 상상만 했던 많은 것들을 직접 만들어보고 실험할 수 있었습니다. 또한 걱정 많고 부족했던 저를 언제나 응원해주시고 지도해주셨기에 석사 과정을 마무리할 수 있었습니다.

바쁘신 와중에도 저의 논문 심사를 맡아주시고 제 미래 진로에 대해 언제나 함께 고민해주시고 격려해주신 김준영 교수님, 하드웨어에 대한 모든 것을 알려주시고 용기를 주신 조용성 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

공학에 대한 흥미를 알려주시고 보다 깊게 공부할 수 있도록 지도해주신 조석제 교수님, 김종화 교수님, 황승욱 교수님, 진강규 교수님, 하운수 교수님, 최진규 교수님, 최종락 박사님 감사합니다.

부족했던 제가 학업과 과제를 수행함에 있어 언제나 본인의 일처럼 도와주시고 상담해주신 지능로봇 및 자동화 실험실의 선배님들(정상기 형님, 강진일 형님, 오지운 형님, 지대형 형님, 손현중 형님, 추우현 형님, 윤종수 형님, Vu, Duc, 김서강)과 낮, 밤 가리지 않고 든든하게 저를 받쳐주었던 후배들(이지형, 진한솔, 김승현, 김명준, 주기범)에게 감사의 말을 전합니다. 지능로봇 실험실과 마찬가지로 언제나 지원해주시고 의논해주신 선박의장 실험실의 고성협 형님, 홍승민 형님, 남건석 형님, 최동호 형님, 나승규 형님, 강현석, 최국화, 이운혁 모두에게 너무 감사드립니다.

더불어 언제나 마음가짐을 다잡게 해주시고 수많은 시간 함께 고민해주신 좌우형님들의 가르침과 공공수요 팀의 추억은 잊지 않겠습니다. 힘들 때 지지대가 되어 주었던 많은 친구들에게도, 미처 언급하지 못한 많은 분들께도 이렇게나마 감사의 뜻을 전합니다.

마지막으로 저를 언제나 응원하고 지지해주신 우리 가족, 사랑하고 감사합니다.

졸업을 앞두고 2년이라는 시간을 더듬어 보니 분명 힘들고 어려운 과정이었습니  
다만 진심으로 즐겁고 보람찬 시간들이었습니다. 즐겁고 보람찬 시간으로 만들어  
주신 많은 분들께 다시 한번 감사의 인사를 드리며 앞으로 나아가겠습니다.

2020년 1월 조 현 준 올림

