



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

유선 무인잠수정 결합형 무인 수상선 시스템 연구

Research of Unmanned Surface Vehicle Combined with Remotely
Operated Vehicle System



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

정동욱

본 논문을 정동욱의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 김 준 영 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 조 용 성 (인)

2017년 12월 22일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	4
2. 무인수상선과 무인잠수정 기구 설계	
2.1 시스템 구조	5
2.2 무인수상선 구조	5
2.3 무인잠수정 구조	7
2.4 원치시스템	8
2.5 무인수상선 및 무인잠수정 제작	8
3. 제어시스템 설계	
3.1 제어시스템 구성	13
3.1.1 무인수상선 제어시스템	13
3.1.2 PC 시스템	17
3.1.3 무인잠수정 제어시스템	19
3.2 배터리 및 전원 회로	21

4. 제어 알고리즘 연구	
4.1 동역학 모델링	22
4.2 무인수상선 운동 시뮬레이션	28
4.3 제어 알고리즘	33
4.4 항법 알고리즘	34
5. 성능 시험	
5.1 GPS 성능 시험	37
5.2 Dynamic Positioning 성능 시험	41
5.3 원치를 이용한 무인 잠수정 수심 제어 성능 시험	43
5.4 무인 수상선 주행 성능 시험	48
6. 결론	
6.1 결론 및 향후과제	50
감사의 글	52
참고문헌	53
부록	54

List of Tables

Table. 1	복합 플랫폼의 해외 개발 사례	2
Table. 2	수중 운동체의 6자유도 방정식	23
Table. 3	무인 수상선 및 무인 잠수정 운동 방정식	27
Table. 4	운동방정식 계수	29
Table. 5	직선 및 회전 주행 시뮬레이션 조건	32
Table. 6	자율주행 시뮬레이션 조건	32
Table. 7	GPS 데이터 평균값	38
Table. 8	Waypoint 좌표	48



List of Figures

Fig. 1 무인수상선-수중로봇 결합시스템 구성도	3
Fig. 2 무인수상선-무인수중선 결합 시스템 개요	4
Fig. 3 무인수상선-무인수중선 결합 시스템 구조	5
Fig. 4 무인수상선 설계도	6
Fig. 5 무인잠수정 외형도	7
Fig. 6 원치 외형	8
Fig. 7 선체 상부 프레임	9
Fig. 8 선체 하부 프레임	9
Fig. 9 무인수상선 추진기 장착 사진	10
Fig. 10 무인잠수정 실물 사진	11
Fig. 11 선체 측면 사진	11
Fig. 12 무인 잠수정 진수 및 회수 시 측면 사진	12
Fig. 13 무인 수상선 하단 사진	12
Fig. 14 무인 수상선 제어시스템 구성도	13
Fig. 15 Septentrio AsteRx-m OEM	14
Fig. 16 EBIMU-9DOFV3	14
Fig. 17 DW400	15
Fig. 18 DSP 28377s	15
Fig. 19 무인수상선 컨트롤박스	16
Fig. 20 RF 통신용 제어 시스템	16
Fig. 21 PC 시스템 구성도	17
Fig. 22 원치 모터 장착부	18
Fig. 23 원치 케이블 출력부	18
Fig. 24 무인잠수정의 제어시스템	19

Fig. 25	SeaTrac x150	20
Fig. 26	MTi-30	20
Fig. 27	PSH series	20
Fig. 28	주 배터리(좌측)와 무인수상선 전장부 배터리(우측)	21
Fig. 29	선체 고정 및 지구 고정 좌표계	22
Fig. 30	무인수상선의 운동시뮬레이션	30
Fig. 31	직선 및 회전 운동 시뮬레이션 결과	31
Fig. 32	자율주행 시뮬레이션 결과	33
Fig. 33	제어 알고리즘 구성도	33
Fig. 34	자율주행 시스템 구성도	34
Fig. 35	자율운항시스템 알고리즘	35
Fig. 36	Dynamic Positioning	36
Fig. 37	GPS 개별 데이터 (1, 2, 3번 GPS)	38
Fig. 38	GPS 개별 데이터 (1, 2번 GPS)	38
Fig. 39	GPS 개별 데이터 (DGPS)	39
Fig. 40	GPS 동적 테스트 시험 위치	40
Fig. 41	GPS 동적 테스트 시험 결과	40
Fig. 42	Dynamic Positioning 시험 위치	41
Fig. 43	무인수상선의 Dynamic Positioning 시험 결과	42
Fig. 44	원해에서의 Dynamic Positioning 시험 결과	43
Fig. 45	수심 제어 성능 시험 위치	44
Fig. 46	원치 수심 제어 성능 시험 결과	44
Fig. 47	원치 수심 제어 성능 시험 결과 - 25초	45
Fig. 48	USBL 데이터	47
Fig. 49	USBL 데이터 - 25초	47
Fig. 50	Waypoint 좌표	48
Fig. 51	자율 주행 성능 시험 결과	49

Research of Unmanned Surface Vehicle Combined with Remotely Operated Vehicle System

Jung, Dongwook

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

Abstract

In this paper, a new hybrid system was proposed to overcome the cumulative navigation error problem of the underwater robot and the battery problem for long time operation. To solve these problems effectively, a hybrid system that combines an USV and an underwater robot was studied.

The USV connected to the underwater robot with a tether cable, enabling GPS data transmission and stable power supply was studied. In addition, by installing a winch system on the USV, it is possible to move and retrieve underwater robots at long distance or at high speed, and depth control of underwater robots is possible. The underwater robot equipped with an underwater camera and a multi-beam echo sounder which can acquire underwater image capture and undersea topography information and can transmit it to the land in real time was designed.

A Line-Of-Sight navigation was studied for the hybrid system to move along the given point. Also, Dynamic Positioning algorithm was studied for the USV to perform its position-keeping while ROV is doing underwater operations.

The good performance of the USV was verified by simulation and experiment using the developed testbed of USV-underwater robot.

KEY WORDS: Unmanned Surface Vehicle, USV, 무인수상선, Remotely Operated Vehicle, ROV, 무인잠수정, Hybrid System, Dynamic Positioning

유선 무인잠수정 결합형 무인 수상선 시스템 연구

정동욱

한국해양대학교 대학원

기계공학과

초록

본 논문에서는 수중 로봇의 장기간 운용 시 발생하는 누적 항해 오차와 배터리 문제를 해결하기 위하여 새로운 하이브리드 시스템을 제안하였다. 상술한 문제들을 효과적으로 해결하기 위하여 USV와 수중로봇을 결합하는 하이브리드 시스템을 연구하였다.

USV는 테더 케이블을 통해 수중로봇과 연결되어 GPS 데이터 전송 및 안정적인 전력 공급이 가능하도록 설계하였다. 또한 USV에 윈치를 설치하여 수중 로봇의 장거리 및 고속 이동과 수심 제어가 가능하다. 수중로봇은 수중 카메라와 멀티 빔 센서를 장착하여 수중 이미지와 해저 지형 정보를 수집할 수 있고 이를 실시간으로 육지로 전송할 수 있도록 설계하였다.

하이브리드 시스템이 지정된 지점을 따라 이동할 수 있도록 Line-Of-Sight 항법을 연구하고 적용하였으며 수중로봇이 수중 작업을 수행하는 동안 수상선이 특정 위치를 유지할 수 있도록 Dynamic Positioning 알고리즘을 연구하였다.

하이브리드 시스템의 성능은 개발된 테스트베드를 사용한 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

KEY WORDS: Unmanned Surface Vehicle, USV, 무인수상선, Remotely Operated Vehicle, ROV, 무인잠수정, Hybrid System, Dynamic Positioning

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

해양환경의 특성상, 해상 작업으로 인한 인명손실을 최소화하기 위해서는 무인 로봇의 개발이 필요하다. 또한, 최근 전세계가 에너지 부족 문제에 직면하여 한정적인 자원을 사용함에 있어서 해양 자원을 발굴하는 것이 주요 이슈가 되고 있다.(신동협 등, 2013) 바다는 무한한 자원을 보유하고 있지만 현재는 일부분만을 활용하고 있으며, 사람이 접근하기 위험한 상황에서의 해양 탐사 및 자원 개발을 위해서는 무인 해양탐사 로봇의 운용이 필수적이다.(지대형, 2016)

해상에서 사용되는 무인로봇은 크게 무인잠수정(UUV)과 무인수상선(USV)으로 구분할 수 있고, 무인 잠수정은 다시 원격제어 무인잠수정(ROV)와 자율 무인잠수정(AUV)로 구분된다.


USV는 해상 경계 또는 해상 위치 고수 등의 임무에 특화되어있다. 하지만 수상선의 특성상 해저면 관측 및 탐색에는 적합하지 않다. 수중 견인체를 이용해 수중 작업을 수행할 수 있지만 견인체 자체가 수중선의 저항으로 작용하고, 견인체 자체에는 이동능력이 없어 정밀한 임무 수행이 불가능하다는 단점이 있다. 최근에는 통신 거리를 증가시켜 USV의 활동 범위를 넓히고, 다양한 센서를 탑재하여 감시 및 정찰 임무 범위를 확대시키는 연구가 수행되고 있다.(Mahacek, et al., 2012) 또한 자율운항 및 원격통제에 필요한 다양한 기술들이 점차 고도화 되어감에 따라 USV의 활용 가능성이 증대되고 타 무인체계와 연계된 임무 수행 연구도 주목받고 있다.(J. E. Manley, 2008)

무인잠수정은 수중 기뢰 탐색 및 제거와 수중 지형 및 물체 탐색 등 수중에서의 임무 수행에 최적화되어있다. ROV는 운용 시스템과 케이블로 연결되어 원격으로 조종되는 잠수정으로, 케이블 길이의 한계로 인해 넓은 범위에서의 탐사는 불가능하지만 특정 목표 지점에서 매니퓰레이터 및 카메라 등을 이용한 수중 작업에 적합하다.(하지훈, 2015) 반대로 AUV는 원거리에서의 작업은 가능하지만 실시간 통신이 어려워 돌발상황에서의 대처능력이 현저히 떨어진다. 잠수정과 조작자 간의 거리가 멀어질 경우 USBL 센서를 통한 거리 측정 역시 불가능해지므로 잠수정의 정확한 위치를 파악하기 힘들어진다는 점이나, 해저에서 취득한 데이터를 조작자

에게 전송하는 방법 또한 AUV의 운용을 제한하는 요소이다.

Table.1은 해외에서 USV와 AUV의 운용상 문제를 해결하기 위하여 개발중인 플랫폼을 소개한 것이다.

<Table.1> 복합 플랫폼의 해외 개발 사례

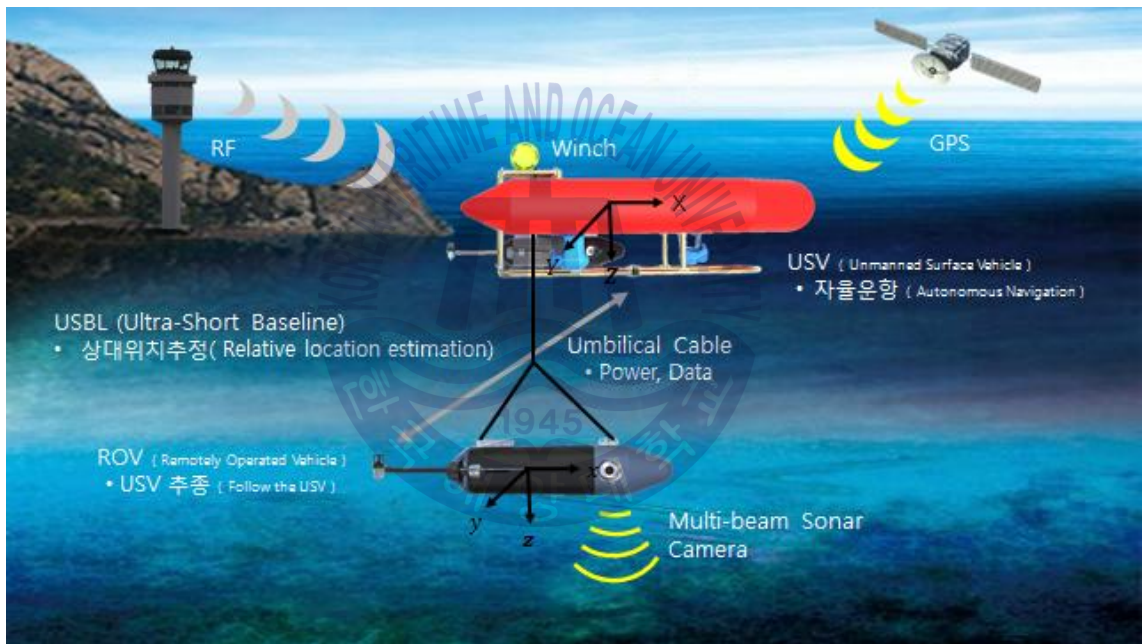
Model	Specification
	<p style="text-align: center;">TRDI / USV/UUV(일본)</p> <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • Autonomous Control for USV • Autonomous Control for UUV • Cooperative Control between USV/UUV • Collision avoidance and underwater communication
	<p style="text-align: center;">Kongsberg / K-Mate(노르웨이)</p> <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • Truly autonomous system • Direct Operator control • Adaptive waypoint following • Scene analysis and collision avoidance

무인수상선에서 수중탐색 임무를 수행하기 위해서는 수중탐색장비 운용이 필수적이다.(M Eriksson, et al., 2013) 일본의 TRDI(Technical Research & Development Institute)와 노르웨이의 Kongsberg에서는 USV와 UUV를 결합한 플랫폼을 개발하였다. (Pearson, et al., 2014)

하지만 이는 USV와 AUV를 결합한 것으로, 다음과 같은 문제점을 갖는다. 첫 번째로, AUV 특성 상 배터리 용량이 제한되고 이동 속도 또한 USV에 비해 크게 떨어지므로 장기간, 장거리 운용이 불가능하다. 또한 수중에서는 전파 감쇠가 크게 일어나 GPS 사용이 불가능하고, 이로 인해 AUV의 위치 파악이 힘들다. 일반적으로 가속도 센서를 이용한 관성항법장치(Inertial Navigation System : INS)를 이용해 수중에서의 위치를 파악하는데, 센서의 가격이 매우 비싸다는 단점이 있다. 또한 초기 정렬 과정을 거쳐야 하고 항법 알고리즘의 특성 상 시간이 지날수록 오차가 누적되므로 이를 고려하여 운용하여야 한다. 마지막으로 수중에서는 전

파 감쇠로 인해 실시간 조작성이 불가능하다.

본 논문에서는 상술한 문제를 해결하기 위해 ROV와 USV를 복합적으로 활용하는 플랫폼을 개발하였다. 플랫폼은 크게 고속이동 가능한 무인 수상선과 수중 관측용 ROV, 그리고 ROV 진/회수용 윈치 시스템으로 구성하였다. 무인수상선은 GPS와 AHRS를 기반으로 위치를 제어하며 윈치 시스템을 사용해 무인잠수정의 수심을 제어하고 무인잠수정은 USBL을 통해 무인수상선과의 상대위치를 추정한다. ROV는 해저면 탐색을 위해 카메라와 멀티빔 센서를 장착 가능하도록 설계하였다.. Fig.1은 무인수상선-수중로봇 결합시스템의 구성도를 나타낸다.



<Fig.1> 무인수상선-수중로봇 결합시스템 구성도

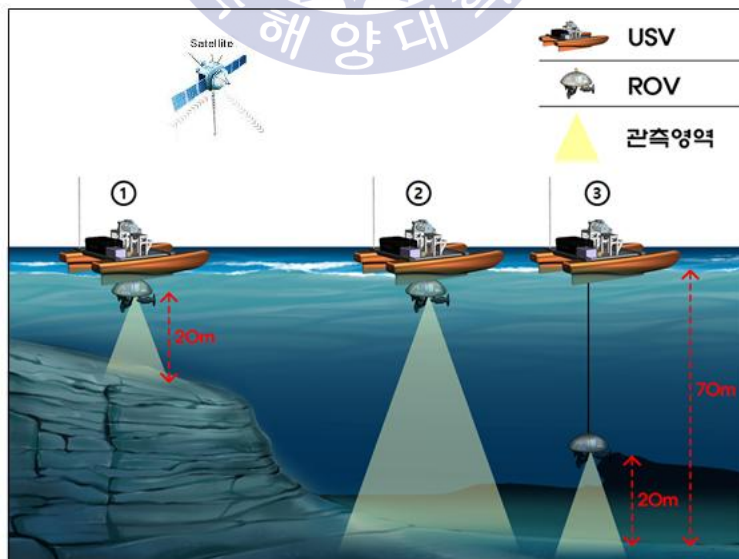
GPS를 사용하여 USV의 정확한 위치를 파악하고, USBL 데이터로 USV와 ROV의 상대 위치를 파악할 수 있다. 이후 GPS 데이터와 USBL 데이터를 연동하면 ROV의 정확한 위치를 파악할 수 있다. 이는 기존의 INS 방식에 비해 더 정확한 위치 결과를 얻을 수 있고, 또한 고가의 센서가 필요 없음을 의미한다. 장거리 이동 시 ROV는 USV에 도킹된 상태로 이동하므로 상대적으로 고속이동이 가능하고, 실시간 통신과 전원 공급은 테더 케이블로 이루어진다.

1.2 연구목적

본 논문에서는 자율주행이 가능한 무인수상선에 ROV를 결합하여 필요 시 ROV를 진수하고 수중 데이터 취득 후 회수할 수 있는 플랫폼을 설계하고 제작하였다.

위와 같은 목적을 위해 본 연구에서는 수상선의 동역학 모델링을 수립하고, 자율주행 임무 수행을 위한 GPS센서와 AHRS센서를 사용한 항법 시스템을 구성하였다. 또한 ROV의 위치와 자세를 파악하기 위한 USBL과 AHRS 센서, 수심 측정기를 부착하고, 수중 데이터 취득을 위한 멀티빔 센서와 수중 카메라를 장착할 수 있도록 설계하였다. 마지막으로 실험역 주행 시험을 통해 개발된 시스템의 성능을 검증하였다.

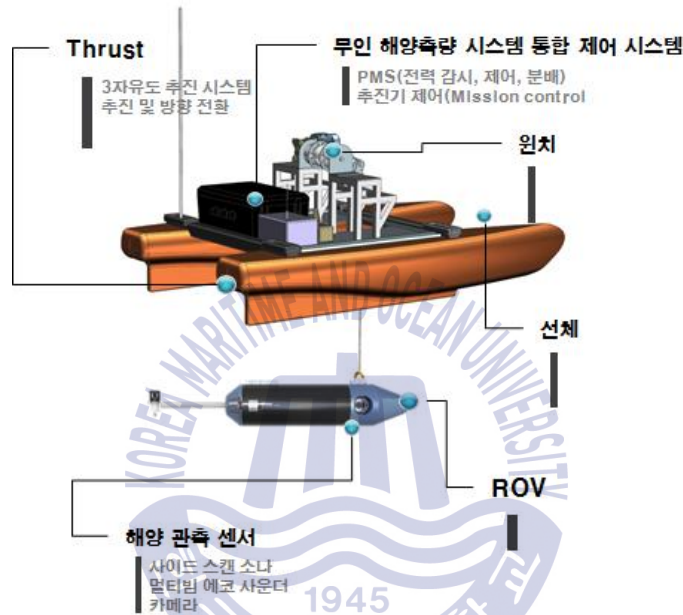
연구 시스템은 원하는 위치로 고속이동 가능한 무인선박, ROV를 진/회수할 수 있는 윈치 시스템과 수중 관측을 할 수 있는 ROV로 구성하였다. 무인선박은 GPS를 기반으로 위치와 자세를 제어하면 3축의 추진기로 구성되며 일정위치에서 DP가 가능한 구조이다. ROV는 설치된 USBL을 통해 선박의 GPS에 대한 상대 위치를 일정주기로 측정하여 정확한 위치를 파악한다. 또한, 윈치를 이용하여 ROV의 심도를 제어하여 ROV에 설치한 사이드 스캔 소나, 멀티빔 에코 사운더와 카메라 시스템을 수심의 깊이에 따라 가변 제어하여 일정한 해상도로 해저의 지물이나 변화를 실시간으로 영상촬영 가능한 시스템으로 이의 개념은 Fig.2와 같다.



<Fig.2> 무인수상선-무인수중선 결합 시스템 개요

제 2 장 무인수상선과 무인잠수정 기구 설계

2.1 시스템 구조



<Fig.3> 무인수상선-무인수중선 결합 시스템 구조

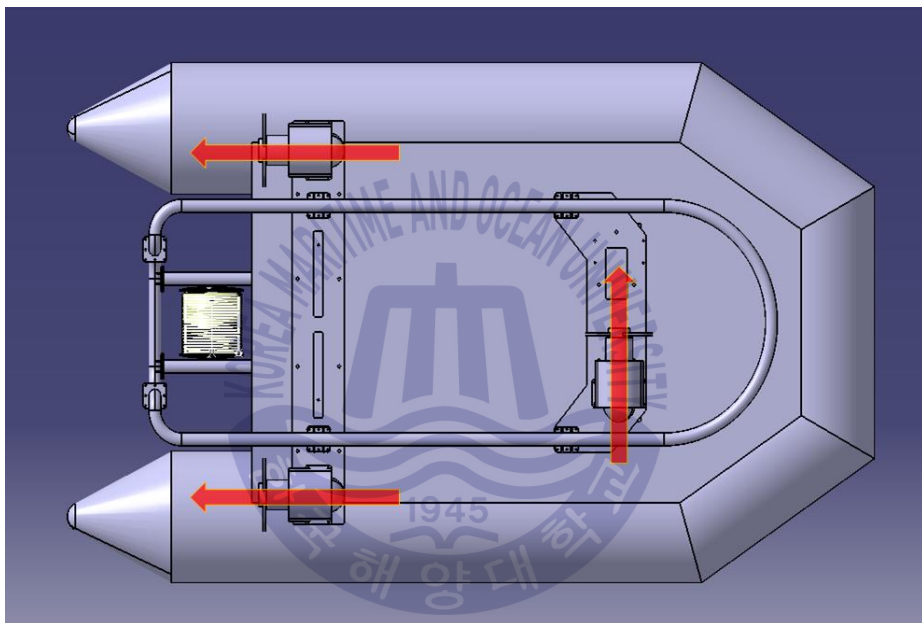
본 논문에서 연구하는 결합 시스템의 구조는 Fig.3과 같다. 무인 수상선은 제어시스템과 추진기, 원치 시스템으로 구성하고 무인 잠수정은 제어시스템과 추진기, 그리고 해양 관측센서 장착부로 구성하였다. 무인 수상선에서 무인 잠수정을 운용하기 위해서는 자동으로 전개 및 회수할 수 있는 시스템이 필요하므로 (D.B. Nicklas, 2015) 수상선에 잠수정 도킹장치를 부착하여 이동 시 잠수정을 도킹할 수 있도록 설계하였다.

2.2 무인수상선 구조

본 논문에서 연구하는 무인 수상선의 선체는 고무보트를 사용하여 설계하였다.(부록 A) 이는 수상선이 장애물과 충돌하더라도 내부 제어 시스템을 보호할 수 있도록 충격을 완화하는 역할을 하는 동시에 충분한 부력을 가질 수 있도록 한다. 수상선은 무인 잠수정의 진수 및 회

수, 수심제어를 담당하고 자율주행 및 Dynamic Positioning 기능을 수행한다. 이를 고려하여 최대 sea state 3에서 임무 수행이 가능하고 전진 시 최대 3knot 이상의 속도를 낼 수 있도록 설계하였다.

플랫폼의 전체 무게가 약 350kg임을 고려했을 때 충분한 추력을 가지고 해수에서 사용가능한 Minn Kota 사의 RT-80 추진기를 선정하였다.(부록 B)



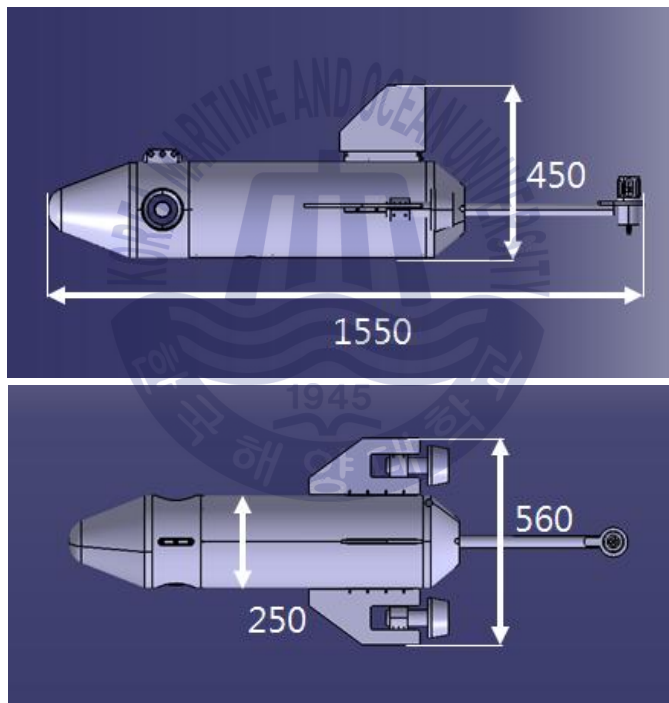
<Fig.4> 무인수상선 설계도

Fig.4는 무인 수상선 하부의 3D 설계도면을 나타낸 것이다. 수상선의 이동 방향을 제어하기 위해 진행방향의 수직방향으로 추진기를 추가 장착하였는데, 이는 진행방향 추진기의 추력 차이로 방향을 제어 하거나 러더를 사용하는 방식에 비해 방향 전환 속도가 빨라 수상선의 회전반경을 줄일 수 있고 일정 위치에서 Dynamic Positioning 기능을 수행할 수 있는 구조로 설계하였다. 또한 무인 수상선의 하부에 파이프를 사용하여 잠수정이 도킹할 수 있는 공간을 제작하였다.

선체 상부에는 시스템의 구성요소를 안정적으로 고정할 수 있는 프레임을 장착하였다.(부록 C) 제어 시스템을 선체 바닥에서 이격시켜 해수 유입을 최소화하였다. 배터리와 기타 장비들을 장착할 수 있는 브라켓을 포함한다.

2.3 무인잠수정 구조

무인 잠수정은 해양탐사 및 측량시 직진성과 지향성을 확보하기 위하여 Torpedo 타입의 ROV로 제작하였다. Fig.5는 설계된 무인 잠수정의 외형도이다. 운용 수심 25m급을 목표로 선체는 외경 250mm, 총 길이 1550mm, 주 날개 끝점 간 길이 560mm, 선체 바닥에서 상부 날개 끝점까지의 거리 450mm로 설계하였다. 총 중량은 45kg, 부력량은 20kg으로 약 25kg의 음성부력을 갖는다. (부록 C)



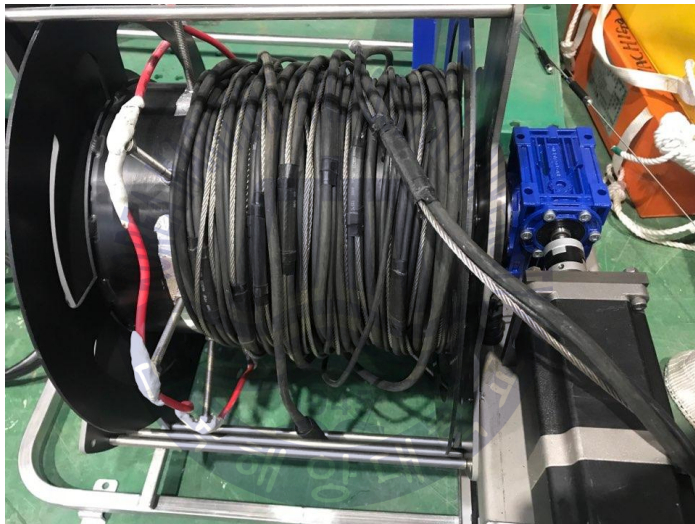
<Fig.5> 무인잠수정 외형도

잠수정은 수상선과 같이 진행방향의 수직방향 추진기를 부착하였다. 추진기는 Tecnadyne의 Model 300으로 선정하였다.(부록 D)

2.4 윈치시스템

무인 수상선의 윈치 시스템은 무인 잠수정의 수심을 제어하기 위하여 사용된다. 테더 케이블을 드럼에 감아 정회전과 역회전을 통해 수상선과 잠수정 간 케이블의 길이를 조절할 수 있도록 설계하였다.

모터는 커플링을 통해 감속기와 연결되고, 감속기의 축이 드럼과 연결되어 회전한다. 케이블이 받는 하중에 의해 드럼이 회전하는 것을 방지하기 위해 감속기는 웜기어 타입을 선정하였다. 또한 윈치가 정회전과 역회전을 반복하더라도 줄이 꼬이지 않도록 케이블 출력단에 슬립링을 장착하였다.



<Fig.6> 윈치 외형

2.5 무인수상선 및 무인잠수정 제작

Fig.7과 Fig.8은 각각 제작된 무인수상선의 상부와 하부 프레임을 나타낸 것이다. 프레임의 재질은 해수로 인한 부식을 최소화하기 위해 STS304로 선정하였다. 프레임은 선체의 상단과 하단을 관통하여 고정된다.



<Fig.7> 선체 상부 프레임



<Fig.8> 선체 하부 프레임



<Fig.9> 무인수상선 추진기 장착 사진

Fig.9는 무인 수상선의 하부 프레임에 추진기가 장착된 사진이다. 수상선이 수면에 떠있는 상태에서도 추진기가 수중에 잠기도록 설계되어 최대의 추력을 출력할 수 있다.



<Fig.10> 무인잠수정 실물 사진

Fig.10은 제작된 무인 잠수정의 실물 사진이다. 몸체 중간의 외장재를 제거하여 관측 센서 장착부를 노출하였다. 무게중심을 조절하기 위하여 MC나일론과 황동을 함께 사용하여 노즈콘을 제작하였다.



<Fig.11> 선체 측면 사진

Fig.11은 제작 완료된 무인 수상선의 측면 사진이다. 제어시스템과 원치시스템을 포함하고 있다. Fig.12와 Fig.13은 무인 수상선과 잠수정이 결합된 상태에서 원치 시스템을 작동한 모습이다.



<Fig.12> 무인 잠수정 진수 및 회수 시 측면 사진



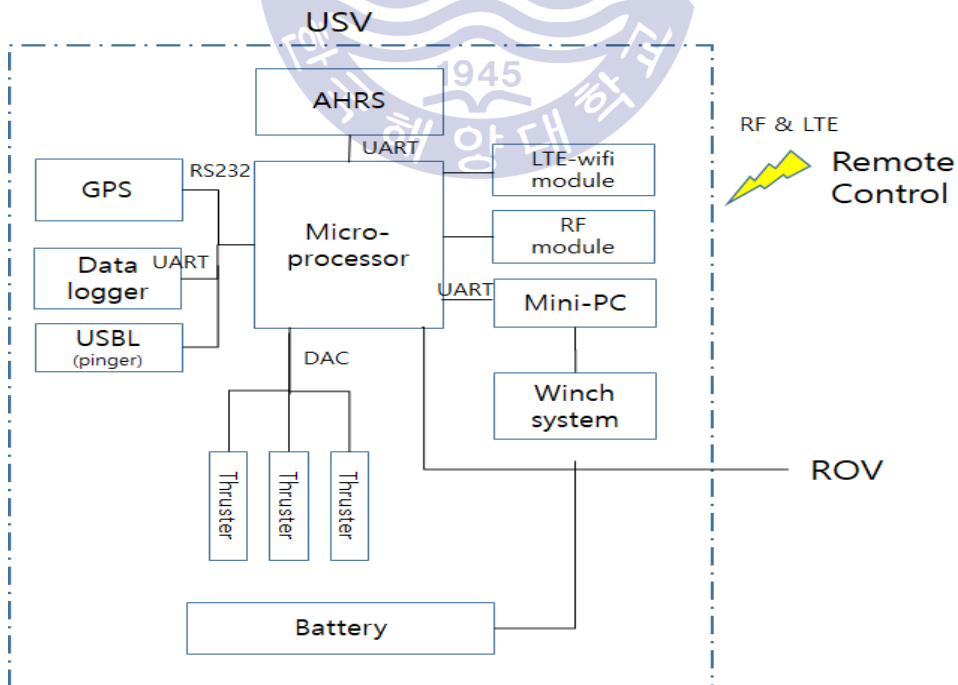
<Fig.13> 무인 수상선 하단 사진

제 3 장 제어시스템 설계

3.1 제어시스템 구성

3.1.1 무인수상선 제어시스템

본 논문에서는 무인 수상선의 경로를 제어하고, 무인 잠수정이 그를 추종할 수 있는 제어시스템을 구성하였다. 무인 수상선은 무인선의 위치, 자세 및 속도를 제어하는 구동부를 포함한 주 제어시스템, 카메라 영상 정보 처리와 무인 수중로봇의 수심을 제어하기 위한 미니 PC 시스템, 그리고 관제 시스템과 수중로봇을 제어하기 위한 통신시스템으로 구성된다. 무인선은 GPS와 AHRS 자료를 바탕으로 현재 위치에서 목표 위치까지의 경로를 계산한 뒤 추진기를 구동해 목표 위치까지 이동한다. 이동과정 또는 목표 위치 도달 후 임무 수행을 위해 윈치 시스템을 구동해 무인잠수정을 진수하거나 회수할 수 있다. 조작자와의 통신은 RF통신과 LTE통신 두 가지를 사용한다. 무인수상선의 제어시스템 구성도는 Fig.14와 같다.

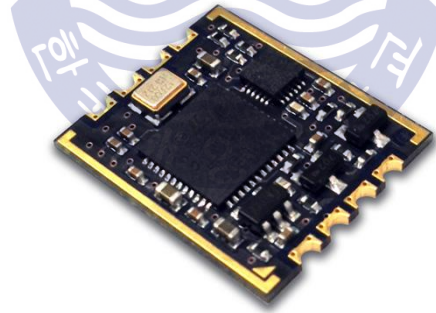


<Fig.14> 무인 수상선 제어시스템 구성도



<Fig.15> Septentrio AsteRx-m OEM

Fig.15는 무인수상선에 사용된 GPS이다. 무인 수상선의 자율운항은 정확한 위치정보를 요구하므로 높은 정밀도와 정확도를 가진 Septentrio 사의 AsteRx-m OEM 제품을 선정하였다.(부록 F)



<Fig.16> EBIMU-9DOFV3

Fig.16은 무인수상선에 사용된 AHRS이다. 무인수상선의 heading을 제어하고 자세를 파악하기 위해 사용된다.(부록 G)



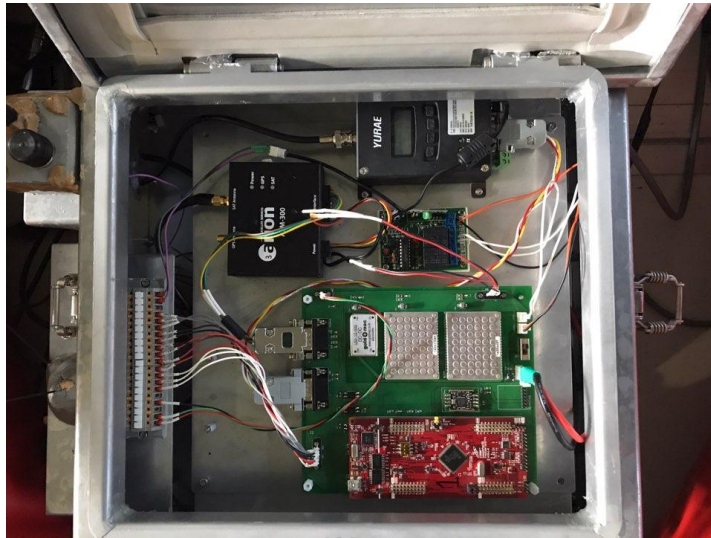
<Fig.17> DW400

Fig.17은 무인수상선에 사용된 RF 송수신기이다. 조작자와 무인수상선간의 RF 통신에 사용된다.(부록 H)



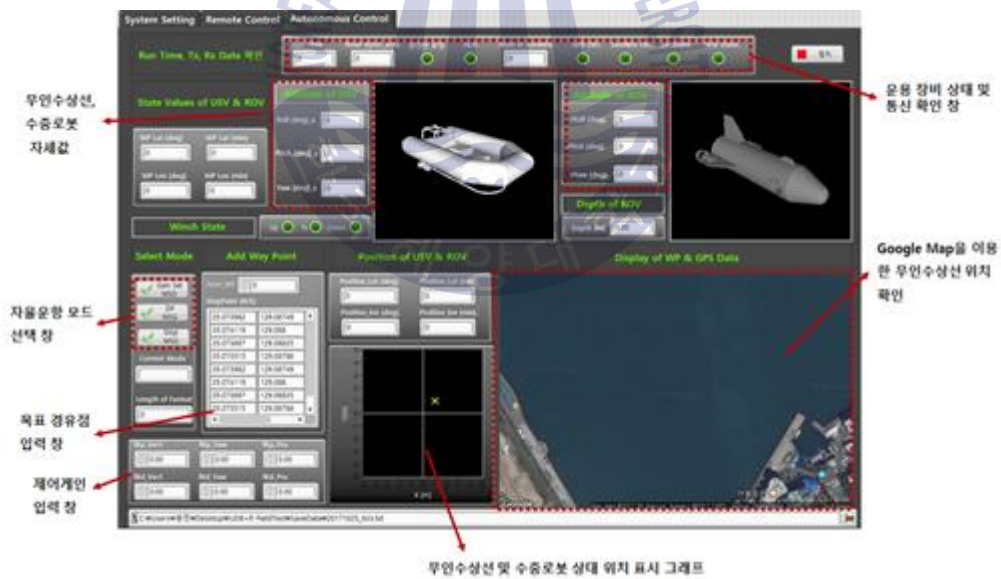
<Fig.18> DSP 28377s

무인수상선의 주 제어시스템에 사용된 마이크로 프로세서는 DSP 28377s이다.(부록 E) DSP는 상술한 GPS와 AHRS 센서로부터 좌표와 자세값을 시리얼 통신으로 입력받아 자율주행 알고리즘을 수행한다. 또한 잠수정과 통신하여 잠수정의 수심을 제어하고, 잠수정과 수상선의 정보들을 RF통신 시스템을 거쳐 오퍼레이터에게 전송한다.



<Fig.19> 무인수상선 컨트롤박스

Fig.19는 무인수상선의 제어시스템이 부착된 컨트롤박스 사진이다.



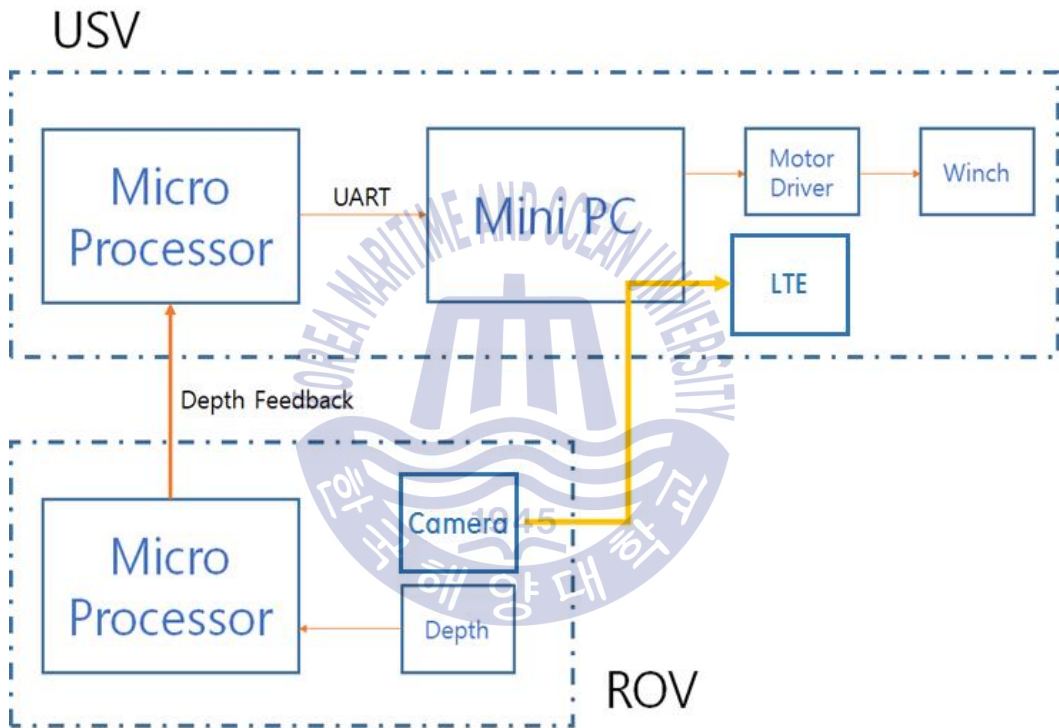
무인수상선 및 수중로봇 상태 위치 표시 그래프

<Fig.20> RF 통신용 제어 시스템

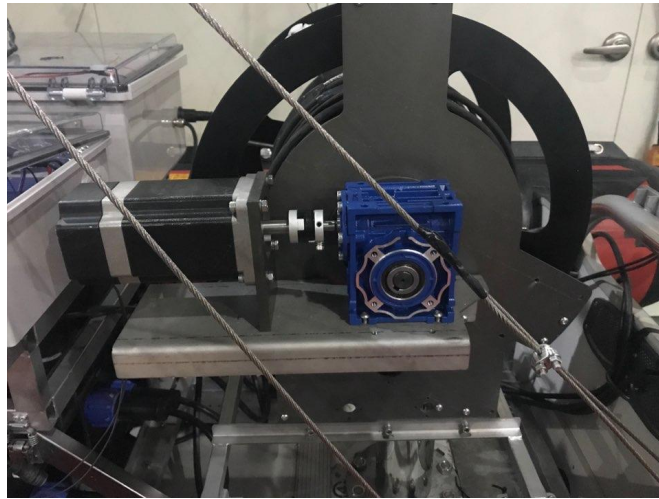
Fig.20은 RF 통신 제어 시스템을 나타낸 것이다. 육상에서 무인 수상선과 잠수정 제어 및 데이터 확인이 가능하다.

3.1.2 PC 시스템

무인수상선의 PC 시스템은 크게 두 가지 영역을 담당한다. 주 제어 시스템의 마이크로 프로세서로부터 UART신호를 전송받아 원치의 모터를 제어하고, 또 ROV로부터 수중카메라 영상정보를 취득하여 가공 후 LTE로 전송하는 역할을 한다. Fig.21은 PC 시스템의 구성도를 간략하게 나타낸 것이다. PC는 Latte Panda로 선정하였다.(부록 I)



<Fig.21> PC 시스템 구성도



<Fig.22> 윈치 모터 장착부

Fig.22는 제작된 윈치의 모터 장착부를 나타낸다. 웜기어 타입의 감속기로 슬립을 방지한다. 사용된 모터는 A63K-G5913이다.(부록 J)



<Fig.23> 윈치 케이블 출력부

Fig.23은 윈치 케이블의 출력부를 나타낸다. 출력부에 슬립링이 장착되어 케이블의 꼬임을 방지한다.

3.1.3 무인잠수정 제어시스템

무인잠수정의 제어시스템은 무인수상선과 동일한 DSP 제어보드를 기반으로 수중로봇의 추진기 구동과 센서 데이터 처리, 무인수상선과의 통신 기능을 수행한다. 취득한 센서 자료와 무인수상선의 자료를 취합해 현재 무인수상선과의 상대 위치를 파악하고, 무인수상선의 이동 경로를 입력받아 추종하는 역할을 수행한다. USBL과 Depth 센서, AHRS 센서를 사용해 잠수정의 상대위치를 계산하여 각 데이터를 무인 수상선으로 전송한하며 해양 탐사를 위한 멀티빔 센서 등을 장착할 수 있는 공간이 추가로 설계되어있다. Fig.24는 무인잠수정의 제어시스템을 나타낸다.

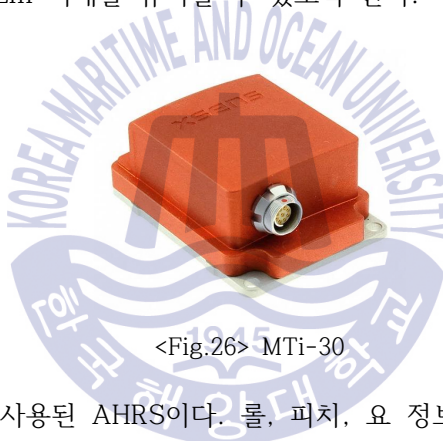


<Fig.24> 무인잠수정의 제어시스템



<Fig.25> SeaTrac x150

Fig.25는 무인 잠수정에 사용된 USBL을 나타낸 것이다. 무인 잠수정과 무인 수상선 사이의 X축, Y축 거리를 각각 취득한다. 무인 수상선의 GPS 정보에 X축, Y축 거리를 합산하여 무인 잠수정의 위치를 GPS 좌표로 환산할 수 있다.(부록 K) 잠수정은 USBL 데이터를 기준으로, 수상선으로부터 위치 오차 2m 이내를 유지할 수 있도록 한다.



<Fig.26> MTi-30

Fig.26은 무인 잠수정에 사용된 AHRS이다. 롤, 피치, 요 정보를 통해 잠수정의 헤딩을 제어하고 자세를 파악한다.(부록 L)



<Fig.27> PSH series

Fig.27은 잠수정의 수심 제어에 사용되는 압력센서이다.(부록 M)

3.2 배터리 및 전원 회로

복합 플랫폼의 전원은 원격 제어 플랫폼의 특성 상 배터리를 사용한다. 플랫폼에서 사용되는 DC 전원은 DC-DC 컨버터(부록 0)를 이용하여 필요한 전압을 정류하여 사용하고, AC 전원은 인버터를 사용하여 공급한다. 운용시간과 임무 수행능력을 고려하여 고용량의 배터리를 선정하였다. 배터리는 크게 두 개로 나누어 무인수상선의 추진기와 윈치, 그리고 인버터를 구동하는데 사용하는 24V 배터리와 무인수상선의 전장부 전원공급에 사용되는 12V 배터리를 따로 구성하였다. 리튬폴리머 배터리 셀을 사용하였으며 주 배터리는 7개의 셀을, 무인수상선 전장부 배터리는 4개의 셀을 직렬로 연결하여 사용한다. 각각의 셀은 완충 시 최대 4.2V의 전압을 가지며 기준 전압은 3.7V이다. 배터리 팩의 총 용량은 주 배터리 400A와 무인수상선 전장부 배터리 40A로 구성된다. 각각의 배터리는 방전과 셀 밸런싱을 위해 BMS 회로를 장착하였다. Fig.28은 주 배터리와 무인수상선의 전장부에 사용되는 배터리의 사진이다.

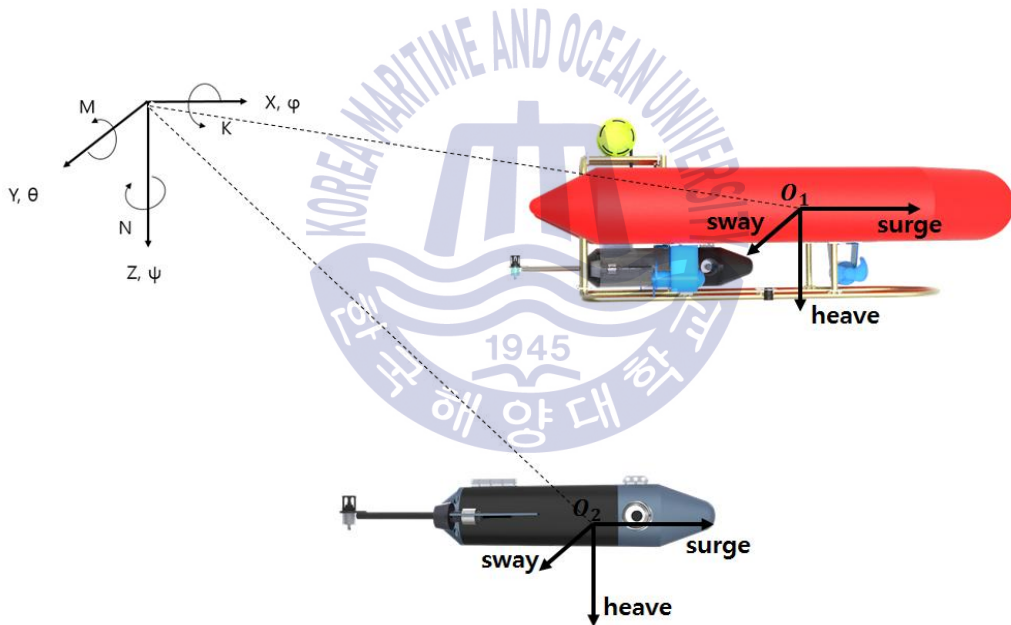


<Fig.28> 주 배터리(좌측)와 무인수상선 전장부 배터리(우측)

제 4 장 동역학 모델링 및 제어 알고리즘

4.1 동역학 모델링

플랫폼의 수학적 모델을 정의하기 위해 수상선과 잠수정의 선체는 강체로 가정한다. 선체 고정 좌표계(Body Fixed Coordinates)와 지구 고정 좌표계(Earth Fixed Coordinates)를 사용하여 무인 수상선과 무인 잠수정의 좌표를 설정하였다. 선체 고정좌표계는 선수방향을 x , 우현 방향을 y , 수직 하단 방향을 z 로 하는 오른손 좌표계를 사용하였으며 각 플랫폼의 운동은 지구고정좌표계로 나타낸다. 지구의 자전과 공전, 예인 케이블의 영향은 무시한다.



<Fig.29> 선체 고정 및 지구 고정 좌표계

지구 고정 좌표계에 대한 선체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 오일러 각은 지구 고정 좌표계를 각 축에 대하여 선체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로 회전은 롤(ϕ), 피치(θ), 요(ψ)의 순으로 정한다. 오일러 각의 경우 동체의 자세가 수직에 가까워지면 자세를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있으나 수중 로봇의 경우 자세가 수

직에 가까운 운동이 거의 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다고 판단되어진다.(김기훈, 2005)

<Table.2> 수중 운동체의 6자유도 방정식

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

무인수상선과 무인잠수정의 운동 방정식을 표현하기에 앞서 일반적인 6자유도 운동체의 운동 방정식을 수립한다. 사용된 좌표축과 변수의 명칭을 Table.2에 나타내었다.

일반적인 6자유도를 갖는 로봇의 운동은 식 (1)의 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T & \eta_1 &= [x \ y \ z]^T & \eta_2 &= [\Phi \ \theta \ \psi]^T \\
 v &= [v_1^T \ v_2^T]^T & v_1 &= [u \ v \ w]^T & v_2 &= [p \ q \ r]^T \\
 \tau &= [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T & \tau_1 &= [X \ Y \ Z]^T & \tau_2 &= [K \ M \ N]^T
 \end{aligned} \tag{1}$$

η 는 지구 고정 좌표계로 표현하는 선체의 위치와 자세, v 와 τ 는 각각 선체 고정좌표계로 표현한 속도와 힘을 의미한다. 선체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계간의 병진 속도 좌표 변환은 다음과 같은 식을 따른다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \tag{2}$$

식 (2)를 행렬로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{3}$$

$J_1(\eta_2)$ 는 오일러 각도 롤(Φ), 피치(θ), 요(ψ)의 함수를 통해 구성된 변환행렬이다. 각 축에 대한 기본적인 회전행렬은 식 (4)와 같은 일반적인 각 축에 대한 회전 각도로 나타낸다.

$$C_{x,\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix}, C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

직교 좌표 공간상에서 자세는 기준 좌표계의 축에 대한 연속적인 회전으로 일반화시켜서 생각할 수 있다.

롤(Φ), 피치(θ), 요(ψ) 순으로 3회의 회전을 통해 $J_1(\eta_2)$ 을 변환행렬이라 하며, 수중 로봇은 오일러 각도의 항들로 회전을 표현한다. 오일러 각도를 이용한 좌표 변환은 x축을 중심으로 Φ 만큼 회전한 후, y축을 중심으로 θ 만큼 회전시키고 마지막으로 z축을 중심으로 ψ 만큼 회전하여 식 (5)의 행렬로 표현할 수 있다.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\theta\sin\Phi & \sin\psi\sin\Phi + \cos\psi\cos\Phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\Phi + \sin\Phi\sin\theta\sin\psi & -\cos\psi\sin\Phi + \sin\theta\sin\psi\cos\Phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\Phi & \cos\theta\cos\Phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

선체 고정 좌표계로 표현되는 각속도 벡터 $\nu_2 = [p \ q \ r]^T$ 와 오일러 속도 벡터 $\dot{\eta}_2 = [\dot{\Phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ 와의 관계는 변환 행렬 $J_1(\eta_2)$ 에 의해 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)\nu_2 \quad (6)$$

식 (6)을 행렬로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (7)$$

다음으로는 지구 고정 좌표계에 대한 선체 고정 좌표계의 자세를 변환행렬 $J_2(\eta_2)$ 의 행렬로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi \tan\theta & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \frac{\sin\Phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\Phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

선체의 무게중심과 부력중심의 위치벡터는 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_G &= [x_G \ y_G \ z_G]^T \\ r_B &= [x_B \ y_B \ z_B]^T \end{aligned} \quad (9)$$

강체의 6자유도 운동방정식은 뉴턴의 운동방정식에서 유도되어 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_g(p^2 + r^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(pr + \dot{p})] &= \Sigma Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= \Sigma K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{v} - uq + vp)] &= \Sigma M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\ + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= \Sigma N \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 x_g, y_g, z_g 는 선체의 질량 중심 위치를 나타내며, 좌항은 질량이 m 인 물체의 거동을 나타내고 우항은 외력을 나타낸다. 우항의 외력에서 X, Y, Z 는 선체의 병진운동에 대한 외력이며, K, M, N 는 회전운동을 할 때 발생하는 외력이다. 선체의 중심을 기준으로 각 방향에 대해 대칭인 형상을 하고 있으므로 원점에서의 관성모멘트는 식 (11)으로 나타낼 수 있다.

$$I_o = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)을 정리하여 간소화하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] &= \Sigma Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= \Sigma K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= \Sigma M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= \Sigma N \end{aligned} \quad (12)$$

이때 외력 항에 작용하는 힘을 구분하면 다음의 식 (13)과 같이 유체정역학적 힘과 양력, 항력, 제어 유체력과 이에 따른 각각의 모멘트들이 있다.

$$\begin{aligned} \sum F_0 &= F_{hydrostatic} + F_{lift} + F_{drag} + F_{control} \\ \sum M_0 &= M_{hydrostatic} + M_{lift} + M_{drag} + M_{control} \end{aligned} \quad (13)$$

상술한 과정을 통해 일반적인 6자유도 운동체의 운동 방정식을 유도하였다. 무인 잠수정과 무인 수상선의 운동 특성을 고려하여 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma X_U &= m_U[\dot{u}_U - v_U r_U - x_{U_y} r_U^2 - y_{U_y} \dot{r}_U] \\ \Sigma Y_U &= m_U[\dot{v}_U + u_U r_U - y_{U_y} r_U^2 + x_{U_y} \dot{r}_U] \\ \Sigma N_U &= I_{U_{zz}} \dot{r}_U + m_U[x_{U_y} \dot{v}_U - y_{U_y} (\dot{u}_U - v_U r_U)] \\ \Sigma X_R &= m_R[\dot{u}_R - v_R r_R - x_{R_y} r_R^2 - y_{R_y} \dot{r}_R] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Sigma Y_R = m_R[\dot{v}_R + u_R r_R - y_{R_g} r_R^2 + x_{R_g} \dot{r}_R] \quad (15)$$

$$\Sigma Z_R = m_R \dot{w}_R$$

$$\Sigma N_R = I_{R_{zz}} \dot{r}_R + m_R [x_{R_g} \dot{v}_R - y_{R_g} (\dot{u}_R - v_R r_R)]$$

무인 수상선은 X, Y, N 세 개의 자유도를, 무인 잠수정은 X, Y, Z, N 네 개의 자유도를 갖는다. 각각의 운동방정식을 식 (14)와 식 (15)에 나타내었다. 사용된 변수는 Table.3에 정리하였다.

<Table.3> 무인 수상선 및 무인 잠수정 운동 방정식

Classification	Axis	Motion	Force & Moment	Velocity	Displacement
USV Translational motion	x	Surge	X_U	u_U	x_U
	y	Sway	Y_U	v_U	y_U
	z	Heave	-	-	-
USV Rotational motion	x	Roll	-	-	-
	y	Pitch	-	-	-
	z	Yaw	N_U	r_U	ψ_U
ROV Translational motion	x	Surge	X_R	u_R	x_R
	y	Sway	Y_R	v_R	y_R
	z	Heave	Z_R	w_R	z_R
ROV Rotational motion	x	Roll	-	-	-
	y	Pitch	-	-	-
	z	Yaw	N_R	r_R	ψ_R

4.2 무인수상선 운동 시뮬레이션

무인 수상선은 2 대의 전방 추진기와 한 대의 측면 추진기로 구성된다. 전방 추진기는 무인 수상선의 이동을, 측면 추진기는 Heading 각도를 제어한다. 각 추진기에 대한 PID 제어를 다음과 같이 설계하였다.

$$u_{position} = K_p \cdot e_{position} + K_i \cdot \int e_{position} dt + K_d \cdot \dot{e}_{position} \quad (16)$$

$$u_{\psi} = K_p \cdot e_{\psi} + K_i \cdot \int e_{\psi} dt + K_d \cdot \dot{e}_{\psi} \quad (17)$$

앞서 4.1장에서 무인수상선의 운동방정식을 유도하였다. 이는 관성유체력과 부가질량 및 유체감쇠력을 배제한 것으로 수상선의 실제 움직임을 예측하기에는 부족함이 있다. 따라서 시뮬레이션을 위해 부가질량과 유체감쇠력을 계산한다.

수상선이 가속도를 가지고 수평면을 이동할 때 받는 영향의 정도를 부가질량에 의한 유체력이라고 말한다. 이는 가속도의 크기에 비례하며 다음과 같이 표현한다. 파도에 의한 외란은 상수로 취급한다.

$$M_{add} = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -Y_r - N_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

관성 유체력은 다음과 같이 표현한다.

$$C_{add} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v + Y_r r \\ 0 & 0 & -X_u u \\ Y_v v - Y_r r & X_u u & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

점성 유체감쇠력은 수상에서 운동하는 물체와 유체와의 상대 속도로 인해 발생하는 감쇠력을 뜻한다. 저속에서 상대적으로 영향이 적은 2차항 이상의 성분을 무시하고 선형 점성유체 감쇠행렬을 표현하였다.

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -N_v - N_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

무인 수상선은 수중 운동체에 비해 추진기의 추진력에 더 큰 영향을 받는다. 무인 수상선의 추진기에 대한 추진력과 모멘트에 대한 식을 다음과 같이 정리하였다.

$$F_x = (T_1 + T_2)(1 - t_p) = (\rho n_1^2 D_p^4 K_T + \rho n_2^2 D_p^4 K_T)(1 - 0.6) = 0.4 \rho D_p^4 K_T (n_1^2 + n_2^2) \quad (21)$$

$$F_y = T_3(1 - t_p) = (\rho n_3^2 D_p^4 K_T)(1 - 0.6) = 0.4 \rho n_3^2 D_p^4 K_T$$

$$F_z = 0$$

$$N_x = T_3(1 - t_p) \times d = 0.4 \rho n_3^2 D_p^4 K_T \times d$$

$$N_y = (T_1 + T_2)(1 - t_p) \times d = 0.4 \rho D_p^4 K_T (n_1^2 + n_2^2) \times d$$

$$N_z = (T_1 - T_2)(1 - t_p) \frac{RB}{2} + T_3(1 - t_p) \frac{RL}{2}$$

위 방정식에 사용된 계수들을 Table.4에 정리하였다.

<Table.4> 운동방정식 계수

Parameters of propellers	
Water density	$\rho = 1031 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Propeller diameter	$D_p = 0.2m$
thrust coefficient	$K_T = 0.4$
thrust deduction coefficient	$t_p = 0.6$
Water raft of Unmanned Surface Vehicle	$d = 0.5m$
The distance between two forward stern thrusters	$RB = 3m$
The distance between two port or starboard thrusters	$RL = 10m$
Revolution of Propeller1 (rpm)	$n_1 = 0$
Revolution of Propeller2 (rpm)	$n_2 = 0$
Revolution of Propeller3 (rpm)	$n_3 = 0$
Thrust force of propeller1	$T_1 = \rho n_1^2 D_p^4 K_T$
Thrust force of propeller2	$T_2 = \rho n_2^2 D_p^4 K_T$
Thrust force of propeller3	$T_3 = \rho n_3^2 D_p^4 K_T$

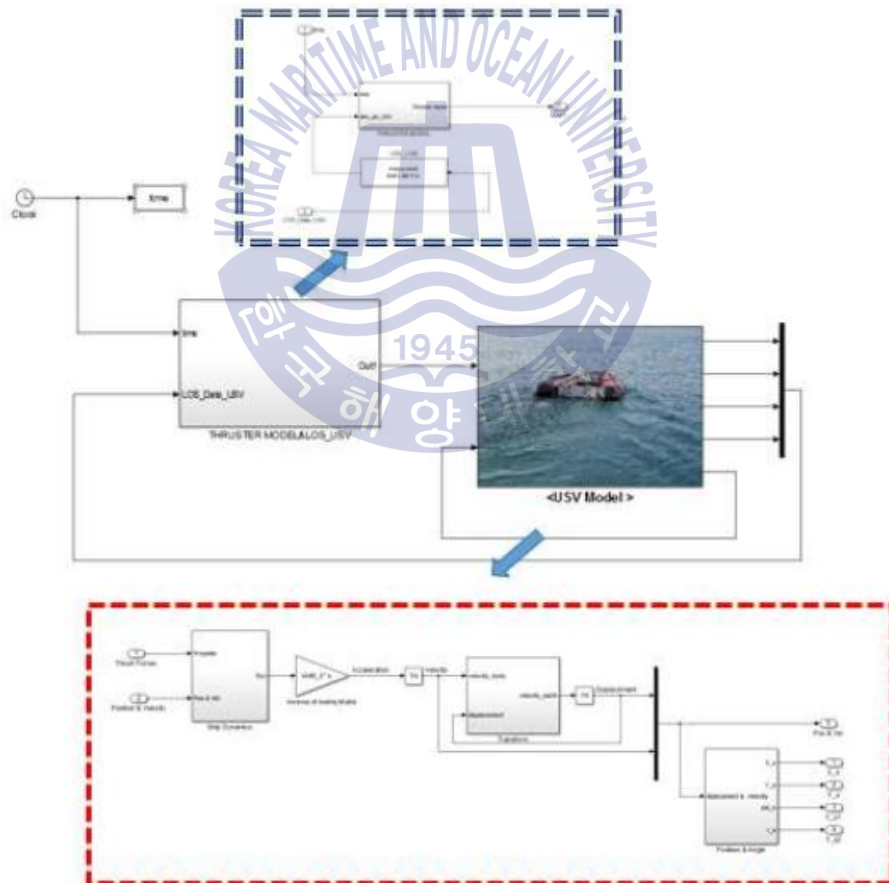
위에서 고려된 각각의 계수들을 외력성분으로 대입하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 다음 식은 무인 수상선에 작용하는 3자유도 유체력을 나타낸 것이며 선형 감쇠, 부가질량 항의 유체력 계수를 나타낸다. (정상기, 2017)

$$X = X_{u|u}|u| + X_u \dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr - \sin\theta + F_x + N_x$$

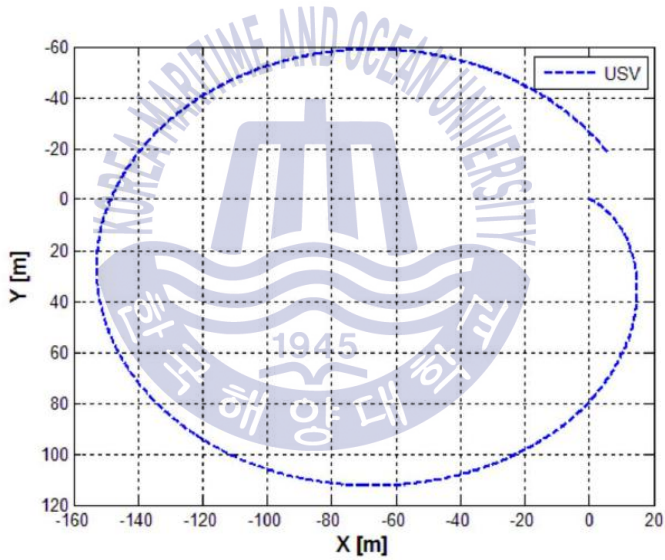
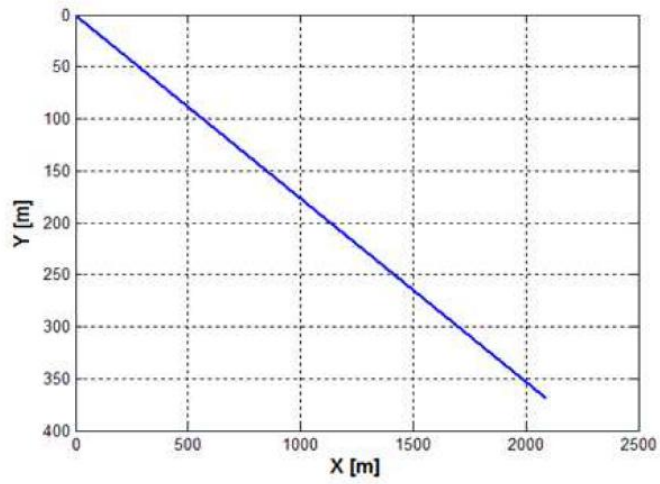
$$Y = Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + \cos\theta \sin\phi + F_y + N_y \quad (22)$$

$$N = N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + (x_G W - x_B B) \cos\theta \sin\phi + \sin\theta + N_z$$

식 (16), (17)과 식 (22)를 이용하여 Fig.30의 운동시뮬레이션을 설계하였다.



<Fig.30> 무인수상선의 운동시뮬레이션



<Fig.31> 직선 및 회전 운동 시뮬레이션 결과

Fig.31은 무인 수상선의 직선 및 회전운동에 대한 시뮬레이션 결과 그래프이다. 좌측의 그래프는 전방 추진기 두 개를 사용하여 직선주행한 결과이고 우측의 그래프는 일정한 Heading 각도 조건 하에서의 회전성능 시험 결과이다. 각각의 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

<Table.5> 직선 및 회전 주행 시뮬레이션 조건

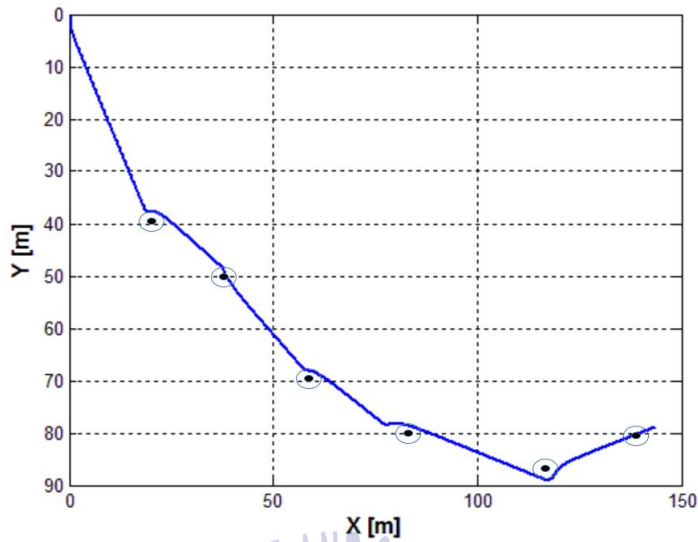
Linear Simulation condition	
Propeller	RPS = 3 (전방 추진체) (round per second)
Heading Angle	angle = 0(degrees)

Circular Simulation condition	
Propeller	RPS = 3 (전방 추진체) (round per second)
Heading Angle	angle = 20 (degrees)

시뮬레이션 결과를 통해 무인 수상선의 직선 및 회전 주행 성능을 파악하였다. 수상선의 운동 성능을 잘 모사하였다고 판단하여 다음 시뮬레이션을 진행하였다.

<Table.6> 자율주행 시뮬레이션 조건

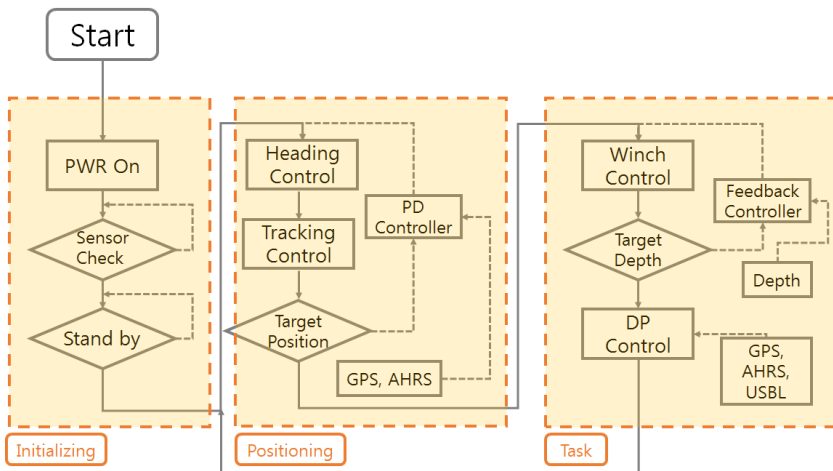
Simulation condition	
Way point	x_1 = 20 , y_1 = 40 (m)
	x_2 = 40 , y_2 = 50 (m)
	x_3 = 60 , y_3 = 70 (m)
	x_4 = 80 , y_4 = 80 (m)
	x_5 = 120 , y_5 = 85 (m)
	x_6 = 140 , y_6 = 80 (m)
경유 목표 지점의 반경 (ρ_c)	3 (m)
Speed (Knot)	1(Knot)



<Fig.32> 자율주행 시뮬레이션 결과

Table.6은 시뮬레이션에 사용된 조건이다. 가상의 웨이포인트 목표점과 목표지점의 경유반경을 설정하고 무인수상선의 자율주행 성능을 시뮬레이션하였다. Fig.32는 시뮬레이션 결과를 나타내며 수상선이 목표지점의 경유반경을 거치며 이동하는 것을 확인하였다. 따라서 무인수상선의 주행성능과 LOS 알고리즘을 신뢰할 수 있다고 판단할 수 있다.

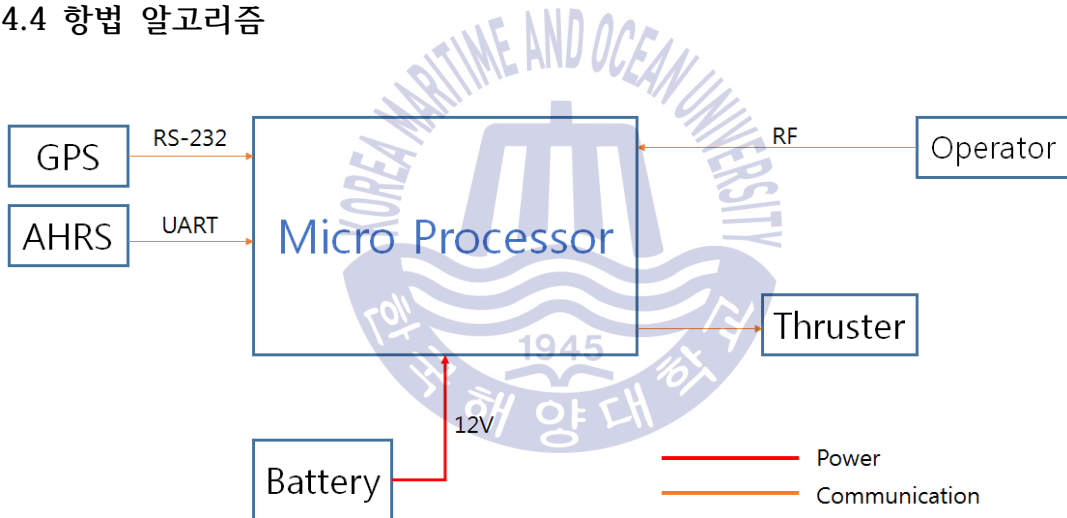
4.3. 제어 알고리즘



<Fig.33> 제어 알고리즘 구성도

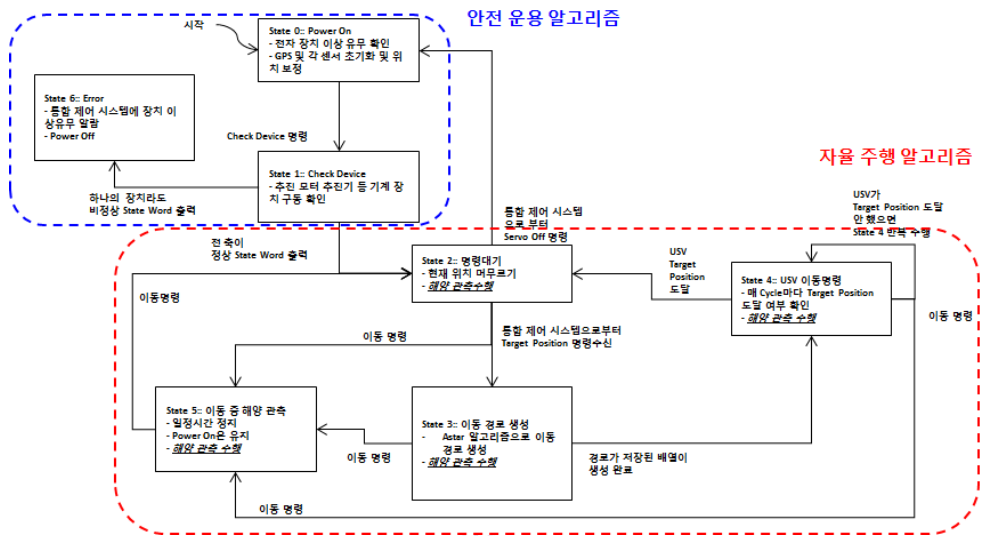
Fig.33은 복합 플랫폼의 제어 알고리즘을 단순화하여 나타낸 것이다. 제어 알고리즘은 크게 세 단계로 나뉘어 각각 플랫폼의 상태 점검 및 명령 대기, 이동, 임무 수행을 담당한다. Initialize 단계에서 전원 인가 후 주 제어 시스템은 전체 플랫폼의 센서와 통신상태를 점검하고 이후 명령 대기 상태로 돌입한다. 이후 명령을 입력받으면 Positioning 단계로 넘어가 Heading과 Tracking 제어 알고리즘과 PD 제어를 통해 목표 위치로 이동하는데 이 때 LOS (Line-Of-Sight) 방법을 이용한다.(4.4절) 목표 위치 도달 후 Task 단계로 넘어가 원치 시스템을 구동하여 잠수정을 진수하고, 잠수정이 목표 수심에 도달하면 DP(Dynamic Positioning) 기능을 사용하여 전체 플랫폼이 특정 위치를 유지한 상태에서 작업을 진행할 수 있도록 한다. 작업 종료 후 다시 Initialize 단계로 돌아가 다음 명령 대기 상태로 돌입한다.

4.4 항법 알고리즘



<Fig.34> 자율주행 시스템 구성도

Fig.34는 무인수상선의 자율주행 시스템에 사용된 마이크로 프로세서의 기능을 간략하게 나타낸 구성도이다. 자율주행 시스템은 시리얼 통신을 이용하여 GPS와 AHRS로부터 각각 위치와 자세 정보를 받고 구성된 주행 알고리즘을 이용해 추진기를 구동한다.



<Fig.35> 자율운항시스템 알고리즘

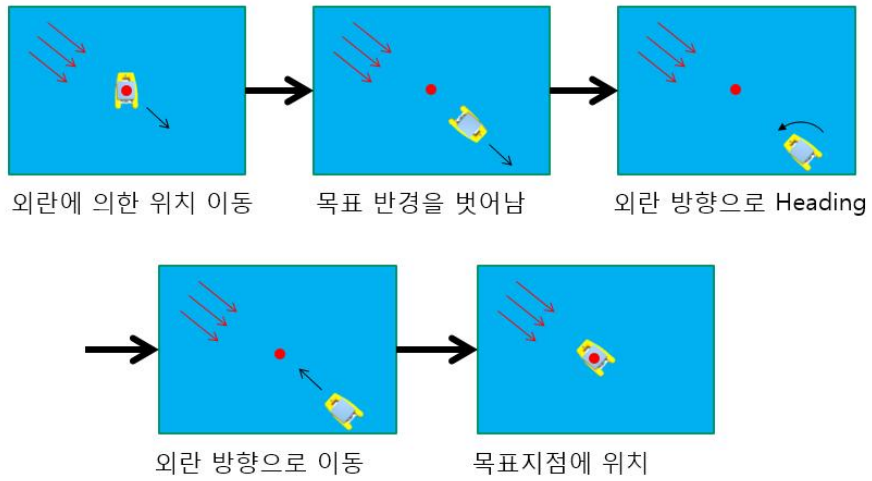
Fig.35는 무인수상선의 자율운항 시스템에 사용된 알고리즘을 표현한 것이다. State 0에서 State 2까지 자율운항 시스템은 장비 점검을 마치고 명령 대기 상태로 돌입한다. 명령 수신 후 마이크로 프로세서는 GPS와 AHRS 센서로부터 취득한 위치와 heading 방향을 기반으로 LOS(Line of Sight) 알고리즘을 이용하여 목표지점까지의 거리와 Heading 각도를 계산하고 이동한다. 계산 방법은 다음과 같다.

$$\psi_U = \tan^{-1} \left[\frac{y_k - y_U}{x_k - x_U} \right] \quad (14)$$

$$\rho_U^2 = [x_k - x_U]^2 + [y_k - y_U]^2 < \rho_c^2 \quad (15)$$

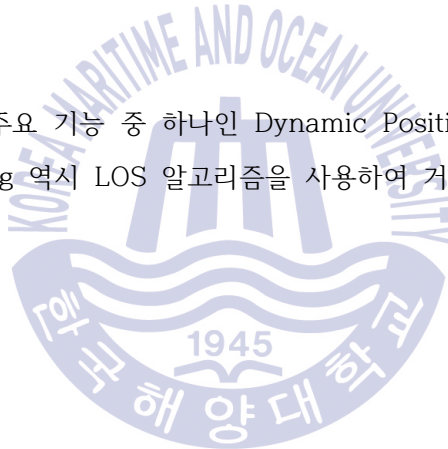
ψ_U 는 목표 Heading 각도, ρ_U 는 거리를 나타낸다. $[x_U, y_U]$ 는 현재 무인 수상선의 x와 y 위치를, $[x_k, y_k]$ 는 목표 지점의 x, y 위치이다. ρ_c 는 목표지점의 경유 반경을 의미하는 것으로, ρ_U 가 ρ_c 보다 작을 경우 목표 지점에 도달했다고 판단하고 다음 작업을 수행하도록 한다.

무인 잠수정 또한 위와 같은 방식으로 무인 수상선의 Heading을 추종한다. 현재 무인 수상선의 Heading을 기준으로 잠수정의 Heading을 제어하며 수상하며 수상선의 이동거리를 입력 받아 그 궤적을 따라 이동한다.



<Fig.36> Dynamic Positioning

Fig.36은 무인수상선의 주요 기능 중 하나인 Dynamic Positioning을 간략하게 표현한 것이다. Dynamic Positioning 역시 LOS 알고리즘을 사용하여 거리와 Heading 각도를 계산한다.



제 5 장 성능 시험

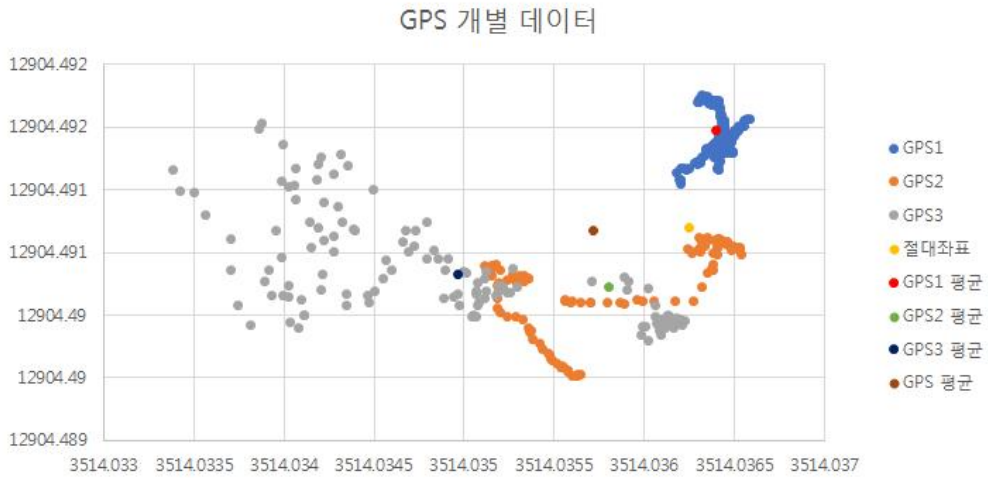
5.1 GPS 성능 시험

복합형 플랫폼의 자율 주행 알고리즘은 GPS 센서의 의존도가 매우 높다. 따라서 GPS의 정확도 및 정밀도가 자율 주행 성능에 직접적인 영향을 준다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 플랫폼 제작에 앞서 GPS 센서의 성능 테스트를 수행하였다. 정적 상태와 동적 상태를 구분하여 각각의 테스트를 수행하였다.

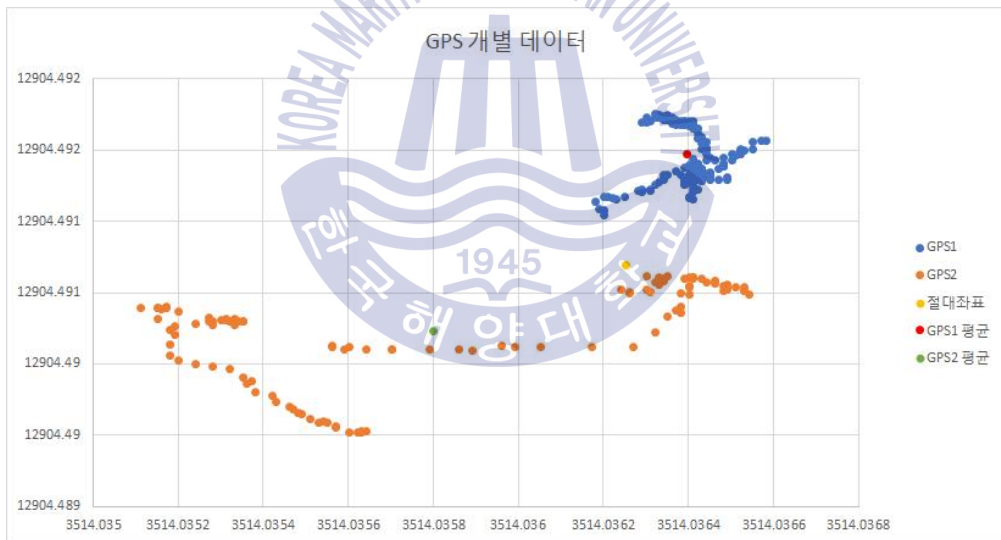
GPS의 특성 상 전원 인가 후 초기 동작 시에는 위성과의 연결이 안정적이지 않아 데이터의 신뢰성이 낮다. 본 시험에서는 이를 방지하기 위해 전원 인가 후 20분이 지난 후 부터의 데이터를 수집하여 분석하였다.

Static 상태에서의 시험은 부산대학교 내 고시좌표를 GPS 데이터의 기준점으로 이용하였다. 이는 국토지리정보원 상시관측소에서 게시한 고시좌표 중 하나이다. 시험은 동일 모델의 GPS 3 대를 사용하여 진행하였으며 각 GPS의 신뢰도는 Signal to Noise Ratio (SNR)으로 판단하였다. GPS 데이터의 출력주기는 0.1s, 10Hz로 설정하였다.

Fig.37은 부산대학교 내 고시좌표를 기준으로 수행한 GPS 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 3번 GPS가 다른 GPS에 비해 오차가 매우 큰 것을 확인하였고 이는 GPS 하드웨어 자체의 문제라고 판단하여 3번 GPS를 제외한 나머지 데이터를 분석하여 Fig.38에 나타내었다.



<Fig.37> GPS 개별 데이터 (1, 2, 3번 GPS)



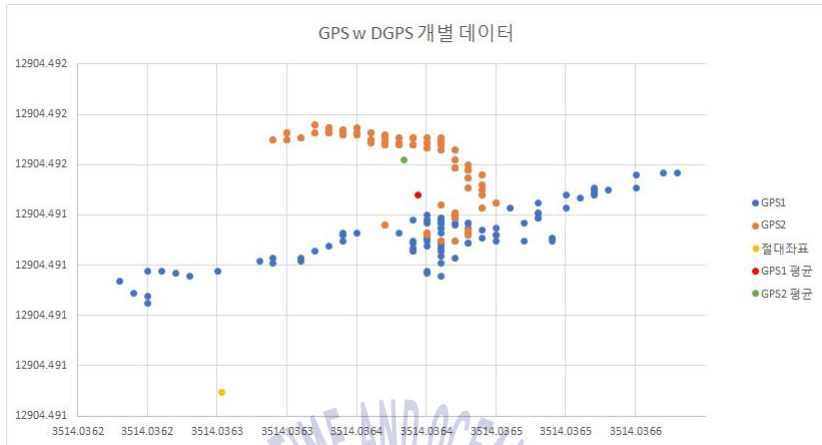
<Fig.38> GPS 개별 데이터 (1, 2번 GPS)

<Table.7> GPS 데이터 평균값

	위도	경도	SNR	위치 오차
GPS1	35.2339399	129.074858	45.89	약 1.5m
GPS2	35.23393002	129.0748372	40.98	약 1.8m
고시 좌표	35.23393756	129.0748449	-	-

1번 GPS의 신뢰도와 위치오차가 2번 GPS에 비해 더 높은 것을 확인할 수 있다.

다음은 1번 GPS의 DGPS 사용시 데이터를 그래프로 나타낸 것이다.



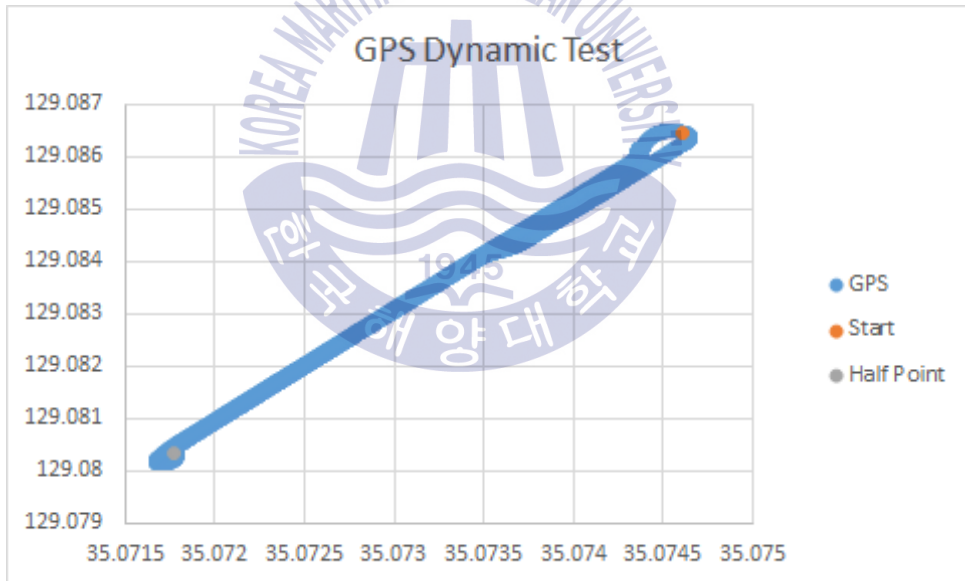
<Fig.39> GPS 개별 데이터 (DGPS)

Fig.39 그래프에서 GPS1은 일반 GPS를, GPS2는 DGPS 데이터를 의미한다. DGPS 사용시 데이터의 정밀도가 일반 GPS에 비해 향상됨을 알 수 있다. 따라서 자율 주행 알고리즘에는 DGPS 정보를 우선적으로 사용하는 것이 적합하다고 판단하였다.

신뢰도가 높은 1번 GPS를 사용하여 동적 테스트를 진행하였다. 실험은 차량에 GPS를 장착한 뒤 일정한 직선거리를 왕복하면서 데이터를 취득하였다. 실험 장소는 Fig.40에 나타내었다.



<Fig.40> GPS 동적 테스트 시험 위치

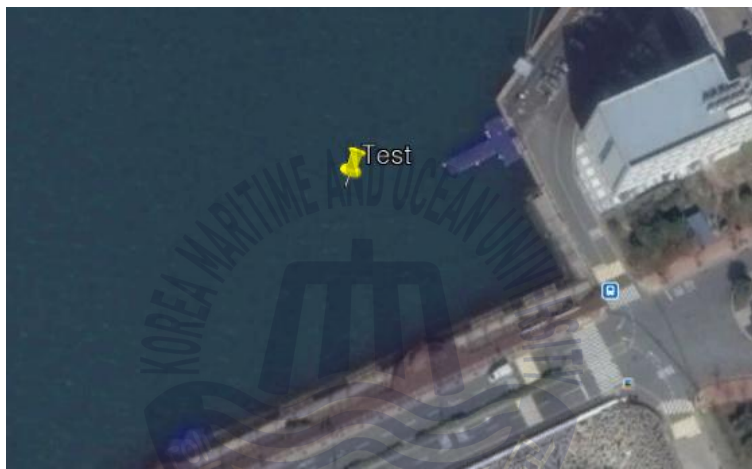


<Fig.41> GPS 동적 테스트 시험 결과

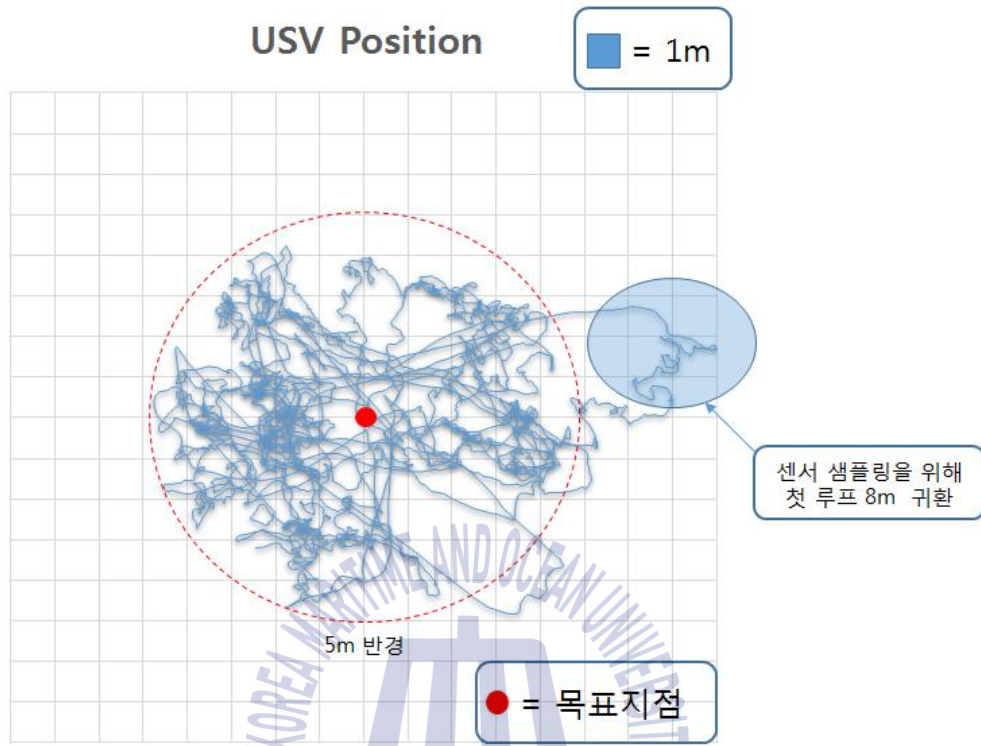
Fig.41은 GPS Dynamic 테스트의 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 출발점에서부터 시작해 반환점을 돌아 다시 출발점으로 돌아오는 경로가 정확하게 표시된 것을 확인할 수 있다.

5.2. Dynamic Positioning 성능 시험

무인 수상선의 주요 기능 중 하나인 Dynamic Positioning 은 플랫폼이 특정 위치를 고수 하면서 작업을 수행하기 위해 꼭 필요한 기능이다. 현재 복합 플랫폼에서는 무인 잠수정의 진수와 회수, 그리고 수중 탐색 작업에 사용된다. Dynamic Positioning의 알고리즘에 관해서는 4.2절에서 설명하였다. 본 시험에서는 실제 실험역상에서 Dynamic Positioning의 성능을 시험하고 GPS 데이터를 분석하였다. Fig.42는 시험 위치를 나타낸 사진이다.

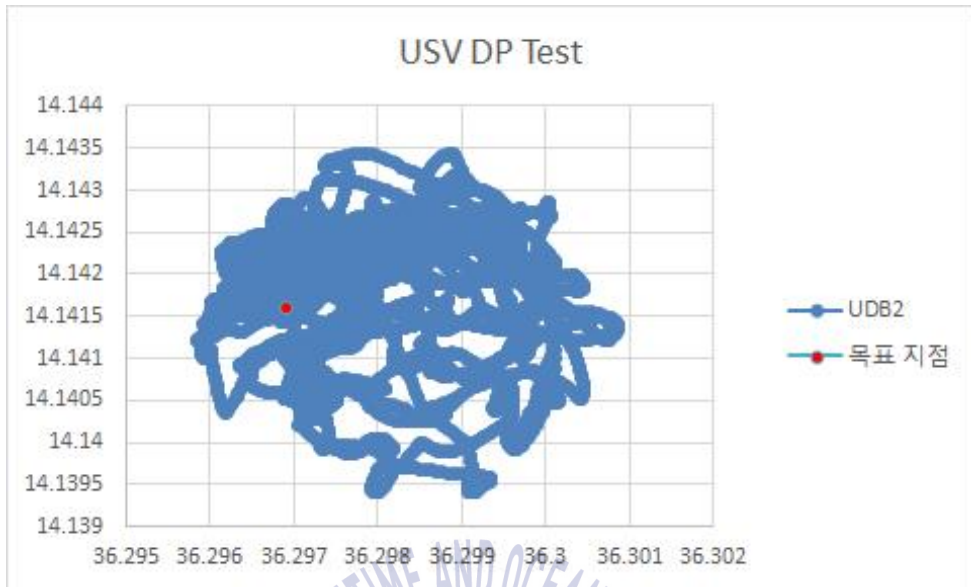


<Fig.42> Dynamic Positioning 시험 위치



<Fig.43> 무인수상선의 Dynamic Positioning 시험 결과

Fig.43은 무인 수상선의 Dynamic Positioning 시험 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 수상선을 목표 지점으로부터 5m 반경 내에 위치하도록 설정하였고 시험 시작 시 센서 샘플링을 위해 목표 지점으로부터 멀리 이동하였다가 다시 복귀하도록 하였다. 시험은 30분간 진행하였으며 대부분의 시간동안 5m 이내에 위치하였다. 바람과 해류 등에 의해 5m 밖으로 벗어난 적이 있었지만 다시 복귀하는 모습을 확인할 수 있다.



<Fig.44> 원해에서의 Dynamic Positioning 시험 결과

Fig.44는 근해가 아닌 원해에서의 시험 데이터를 나타낸 그래프이다. Sea state 3 이상의 해상조건에서 획득한 데이터로 실제 해상 조건에서 무인 수상선의 Dynamic Positioning 성능을 확인하였다.

5.3 원치를 이용한 무인 잠수정 수심 제어 성능 시험

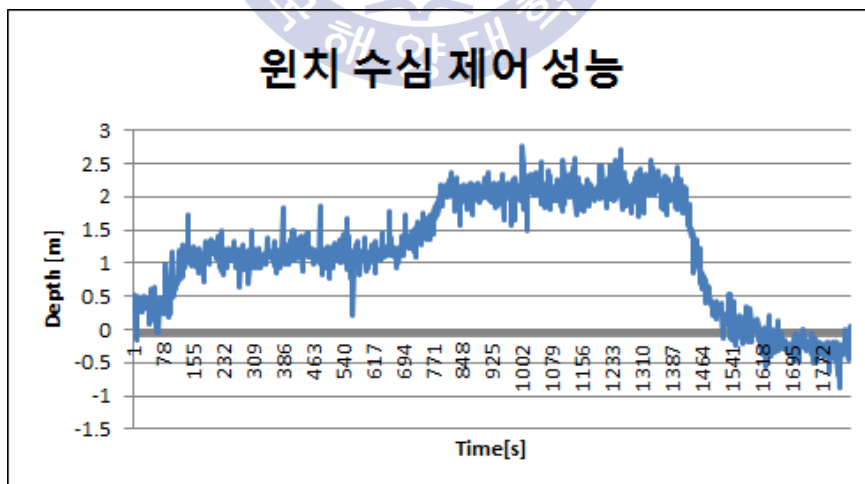
무인 잠수정은 수심을 제어하기 위한 별도의 추진기를 장착하고 있지 않다. 따라서 무인 잠수정의 수심 제어는 오로지 수상선에 부착된 원치로 이루어지게 된다. 본 시험에서는 원치를 이용하여 무인 잠수정의 수심을 제어하고, 수심 제어상태에서의 무인잠수정의 USBL 데이터를 분석한다.



<Fig.45> 수심 제어 성능 시험 위치

Fig.45는 수심 제어 성능 시험의 위치를 나타낸다. 무인 수상선이 지도에 표시된 좌표에서 Dynamic Positioning 기능을 수행하는 동안 동시에 원치를 사용해 무인 잠수정의 수심을 제어하였다.

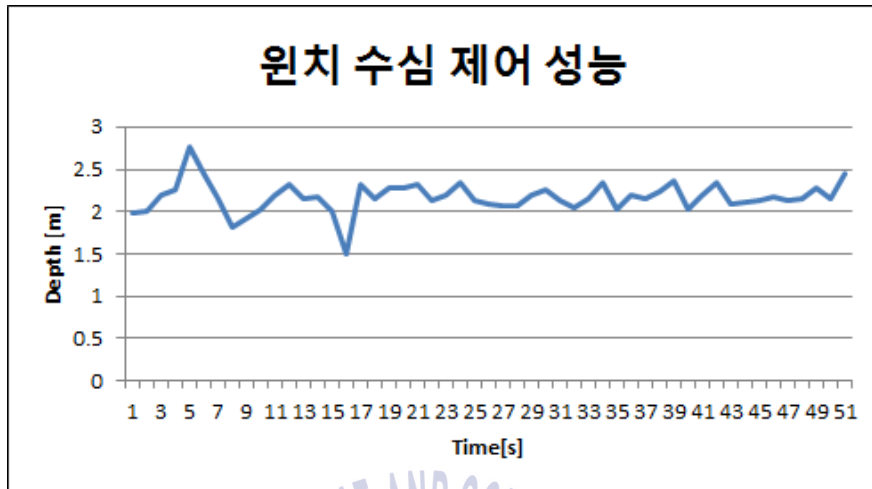
수심 제어는 두 단계로 나누어 진행하였다. 초기 상태에서 무인 잠수정을 수심 1m까지 진수한 뒤 약 5분간 수심 제어, 다시 수심 2m까지 진수한 뒤 5분간 제어하였다. 무인 잠수정은 수심 제어 중 무인 수상선으로부터 오차범위 2m 내에 위치할 수 있도록 하였다.



<Fig.46> 원치 수심 제어 성능 시험 결과

Fig.46은 수심 제어 성능 시험결과 데이터를 나타낸 그래프이다. 데이터는 0.5s, 2Hz의 주

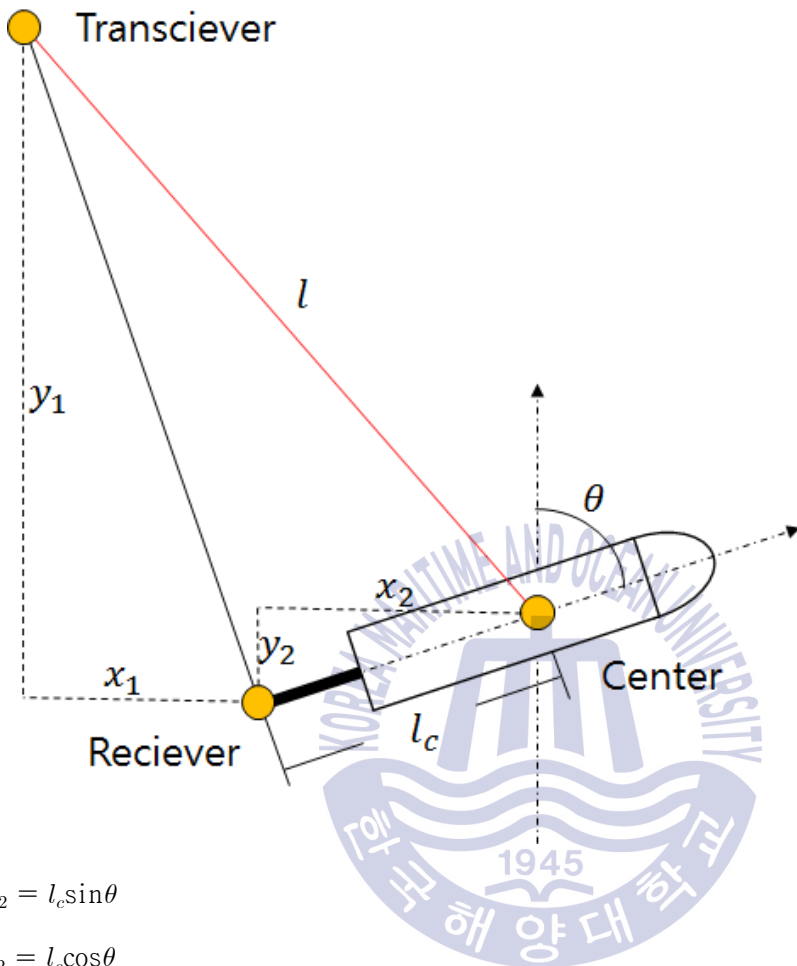
기로 저장하였다.



<Fig.47> 원치 수심 제어 성능 시험 결과 - 25초

Fig.47은 Fig.44의 데이터 중 25초 동안의 데이터를 추출하여 나타낸 것이다. 파도에 의한 Heaving 모션으로 인해 데이터의 오실레이션이 발생하였으나 대체적으로 2m의 수심을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

USBL 데이터는 트랜시버와 리시버 간의 X, Y축 거리 데이터로 나타나며 0.1m 단위로 표현된다. 현재 무인 잠수정의 리시버가 잠수정의 후미에 달려있으므로 정확한 위치 파악을 위해서 USBL 데이터에 오프셋을 설정할 필요가 있다. 데이터 오프셋은 다음과 같이 계산하였다..



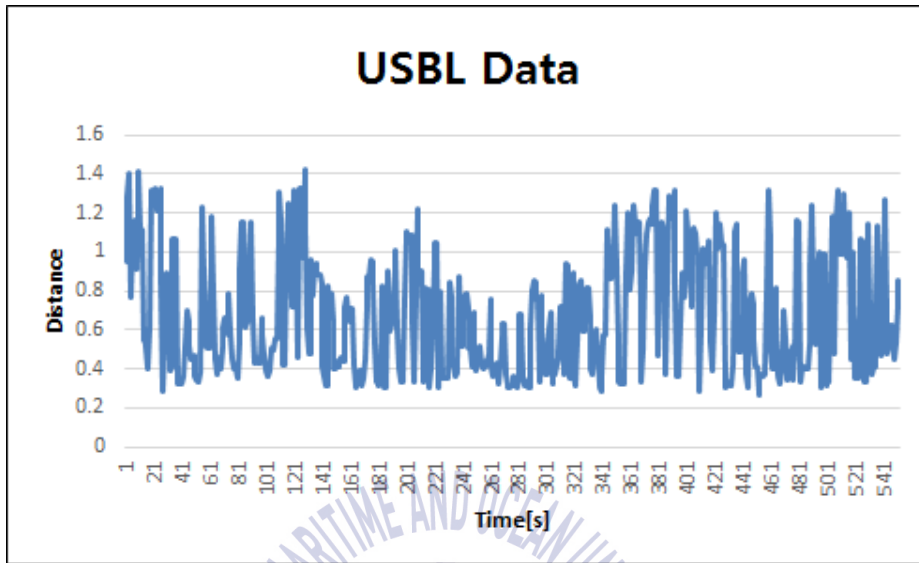
$$x_2 = l_c \sin \theta$$

$$y_2 = l_c \cos \theta$$

$$l = \sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = \sqrt{(x_1 + l_c \sin \theta)^2 + (y_1 - l_c \cos \theta)^2}$$

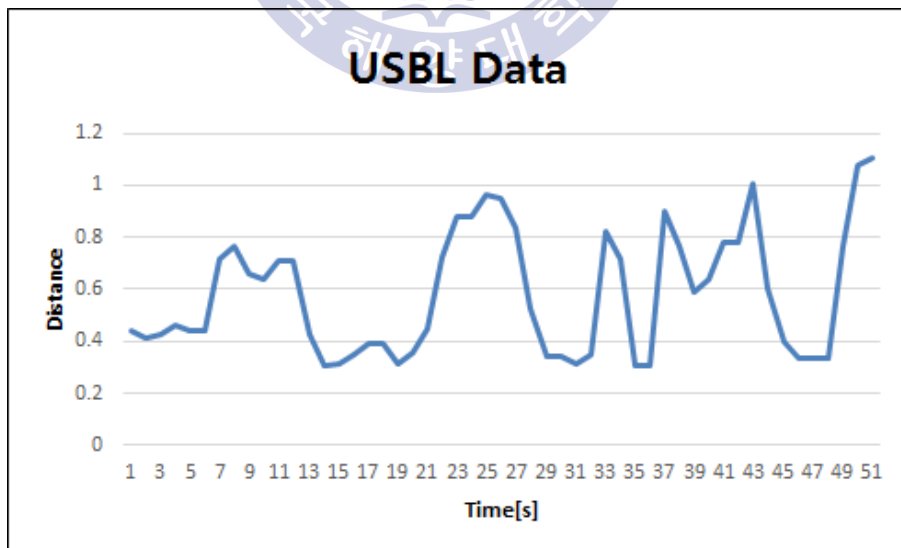
(23)

오프셋을 적용한 무인잠수정의 USBL 데이터는 다음과 같다.



<Fig.48> USBL 데이터

무인 잠수정이 최대 오차 1.5m 이내에 모두 위치하고 있음을 알 수 있다. 최대 1.5m 내외의 오실레이션이 발생하였는데 이는 파도에 의한 것으로 판단하였다. Fig.47과 같은 시간동안 추출한 데이터를 Fig.49에 나타내었다.



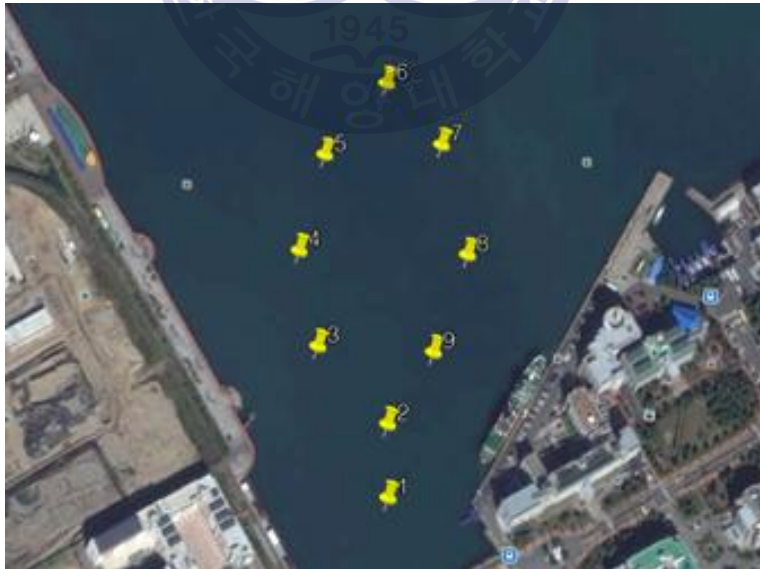
<Fig.49> USBL 데이터 - 25초

5.3 무인 수상선 주행 성능 시험

복합플랫폼의 작업 수행을 자동화하기 위해서는 무인 수상선의 자율 주행 성능 확보가 우선되어야 한다. 본 시험에서는 미리 주어진 9개의 좌표를 이용해 무인 수상선이 경로를 설정하고 이를 따라 이동하는 웨이포인트 주행 성능을 테스트하였다. 목표 좌표는 Table.8과 같다. 본 시험에서 무인 잠수정은 0.5m만큼 진수한 상태를 유지하였다.

<Table.8> Waypoint 좌표

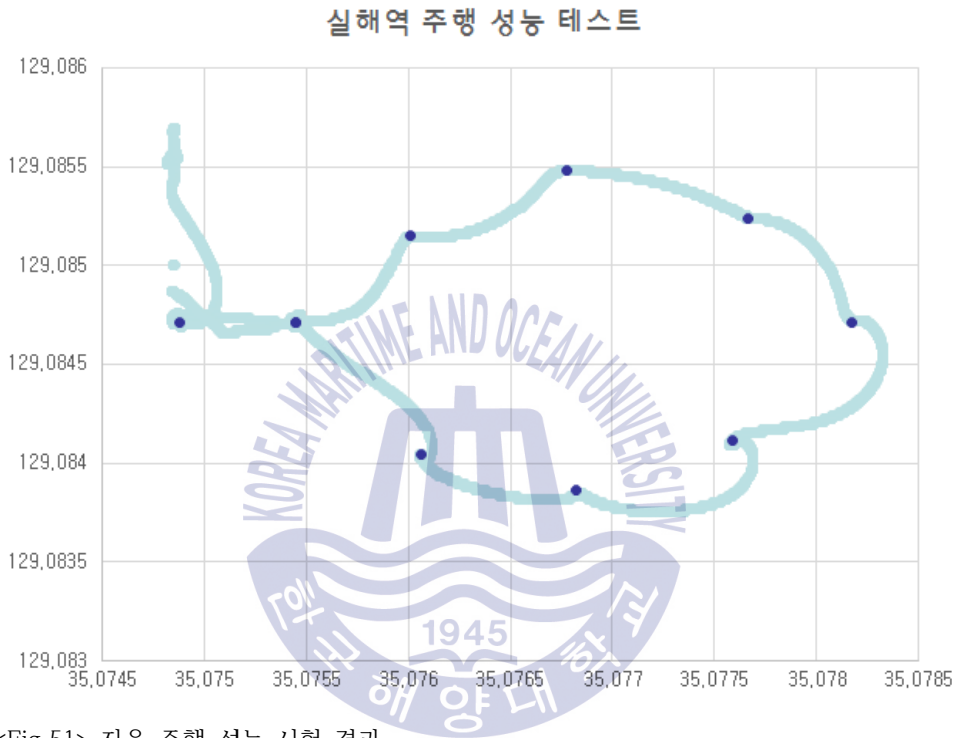
	위도	경도	비고
Waypoint1	35.07488176	129.08471178	대기 지점
Waypoint2	35.07545101	129.08471237	시작 / 도착 지점
Waypoint3	35.07606289	129.08404620	
Waypoint4	35.07682201	129.08386746	
Waypoint5	35.07759138	129.08411189	
Waypoint6	35.07817075	129.08471518	반환점
Waypoint7	35.07766438	129.08524041	
Waypoint8	35.07677871	129.08548313	
Waypoint9	35.07600941	129.08514893	



<Fig.50> Waypoint 좌표

Fig.50은 Table.22의 좌표를 사진으로 나타낸 것이다. 본 시험에서 수상선은 1번 대기지점

으로 이동한 뒤 Dynamic Positioning 기능을 수행하며 다음 명령을 기다린다. 이후 8개의 Waypoint 좌표를 수신하면 차례대로 좌표를 따라 이동하며 각 좌표별 경유반경은 1.5m로 설정하였다. 9번 좌표까지 이동하면 다시 처음 시작 좌표인 2번 좌표로 이동하여 DP 기능을 수행하도록 하였다.



<Fig.51> 자율 주행 성능 시험 결과

Fig.51은 자율주행 성능시험의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 연한 색으로 표시된 좌표는 수상선의 GPS 데이터를 표시한 것이고 진한 색은 Waypoint를 표시한 것이다. 해류와 바람에 의해 일정한 방향으로 밀리는 양상을 보이지만 다시 Heading을 잡아 목표 지점을 정확히 통과하는 것을 볼 수 있다.

제 6 장 결론

6.1 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 무인 수상선과 무인 잠수정을 결합한 플랫폼을 개발하고 운용하기 위해 무인 수상선과 무인 잠수정을 설계하고 제작하였으며, 이를 바탕으로 무인 수상선의 운동 시뮬레이션과 이를 바탕으로 제작한 플랫폼의 성능시험을 하였다.

무인 수상선의 이동을 위해 GPS와 AHRS 기반의 LOS 항법 알고리즘을 개발하였으며 항법 알고리즘의 정확성 판단을 위해 정적, 동적 시험을 통하여 GPS 센서의 신뢰성을 확보하였고 DGPS와 일반 GPS의 오차값을 비교하였다. 또한 Dynamic Positioning 기능의 알고리즘을 개발하고 테스트를 통해 실해역에서의 운용 가능성을 확인하였다. 항법 시뮬레이션 결과 실제 플랫폼에 충분히 적용할 수 있을 정도의 결과를 얻었고, 실제 해상실험에서는 GPS의 위치 오차 약 1.5m, DP 성능 오차 5m 이내로 실해역 테스트 또한 만족할 수 있는 결과를 도출하였다.

무인 잠수정의 수심 제어를 위한 윈치 시스템을 설계하고 제작하였으며 이를 이용한 잠수정의 수심 제어 성능을 확인하였고, USBL 데이터를 이용해 잠수정의 상대 위치 오차를 확인하였다. 수심 제어는 오차 0.5m 내외로, 파도에 의해 발생한 오실레이션을 제외한다면 목표 수심에 수렴하였다. USBL센서를 활용하여 측정한 무인 잠수정의 위치 오차 또한 최대 1.5m 이하로 기존 목표였던 2m이내에 위치함을 확인하였다.

복합 플랫폼의 주행 성능을 확인하기 위해 자율주행 성능 시험을 수행하였다. 잠수정은 0.5m 진수한 후 수심을 유지하도록 하였으며 수상선은 총 10개의 좌표를 따라 주행하였다. 각 좌표의 경유반경은 1.5m로, 3m로 설정했던 시뮬레이션에 비해 좁게 설정하였으며 시험 결과 외란에 의해 플랫폼의 병진 운동이 발생하더라도 Heading을 재설정해 목표 지점을 통과하는 것을 확인할 수 있었다.

추후 제작된 무인 수상선과 잠수정을 기반으로 더 효율적인 Heading과 추진 알고리즘을 연구할 것이며 USBL 데이터를 이용한 무인 잠수정의 피드백 제어가 가능하도록 개선할 것이다. 또한 원치 시스템을 이용한 진수 및 회수 시스템에 Active Heaving Control System을 적용한다면 파도에 의해 발생하는 Heaving 모션으로 인한 수심 오차를 대폭 줄일 수 있을 것으로 보인다. 잠수정에 수중 카메라 및 소나 센서의 추가 장착을 통해 플랫폼의 해저 탐사 임무 수행 능력을 향상시키는 연구를 진행할 계획이다.



감사의 글

먼저 석사 과정 동안 연구에 매진할 수 있도록 끊임없는 격려와 지도를 해주신 최형식 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님은 제 능력 향상은 물론, 능력 이상의 것을 펼칠 수 있도록 조언과 충고를 아끼지 않으셨습니다. 많은 가르침을 주시고 늘 응원해주시는 최형식 교수님이 계셨기에 석사 생활을 잘 마무리할 수 있었습니다. 그리고 바쁘신 가운데 저의 논문 심사를 맡아주시고, 소중한 조언과 충고의 말씀을 해주신 김준영 교수님, 조용성 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

처음 실험실에 들어온 지 벌써 2년 반이 지났습니다. 결코 짧다고는 할 수 없는 시간이지만, 처음 실험실에 발을 들이던 때가 아직도 아른거립니다. 처음에는 단지 로봇을 내 손으로 만들어보고 싶다는, 다소 무모한 이유로 이 길을 선택하였습니다. 지금은 그 무모함에 감사하고 있습니다. 저의 무모함을 감사함으로 만들어 준 여러 인연들께 감사드립니다. 진일이형, 상기형, 지윤이형, 대형이형, 서강이형, 승민이형, 현석이형을 비롯해 여러 선배님들, 그리고 매 실험마다 아낌없이 도움을 주었던 후배님들 덕분에 아무 탈 없이 실험실 생활을 할 수 있었습니다. 지면을 통해 언급하지 못한 분들에게도 다시 한번 감사드립니다.

마지막으로 저의 선택을 믿어주고 아낌없이 지원해주신 가족들께 감사드립니다. 먼 곳에 떨어져 생활하고 있었지만, 그렇다고 느껴지지 않을 만큼 모든 면에서 도움을 주신 모든 가족들에게 감사드립니다.

2017년 11월 26일

정 동 욱

참고문헌

- 신동협, 배서룡, 백운경, & 주문갑, 2013. 퍼지 PD 제어기를 사용한 자율 무인 잠수정의 경유점 추적. 한국정보기술학회논문지, 11(5), pp.1-7.
- 지대형, 2016. 하이브리드 수중 글라이더의 제어 연구, 석사학위 논문. 부산:한국해양대학교
- 김기훈, 2005. 무인잠수정 SNUUV I의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석. 박사학위 논문. 서울:서울대학교
- 정상기, 2017. 하이브리드 수중글라이더 항법 시스템 설계 및 무인 수상선과의 협력제어 시스템 연구. 박사학위 논문. 부산:한국해양대학교
- 하지훈, 2015. 하이브리드 수중 글라이더의 설계 연구, 석사학위논문. 부산:한국해양대학교
- Pearson, David. et al., 2014, High-level fuzzy logic guidance system for an unmanned surface vehicle (USV) tasked to perform autonomous launch and recovery (ALR) of an autonomous underwater vehicle (AUV). 2014 IEEE.
- Mahecek, Paul, Christopher A. Kitts, and Ignacio Mas, 2012, Dynamic guarding of marine assets through cluster control of automated surface vessel fleets, IEEE/ASME Transactions, Vol 17, No. 1, pp.65-75
- J.E. Manley, 2008, Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development, Proc. MTS/IEEE Oceans 2008, Quebec City, Canada.
- D.B. Nicklas, 2015, Development of Overhead Launch and Recovery System, Master Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Spong, M.W., 1989, Robot Dynamics and Control. Wiley

부록

NICE BOAT 300

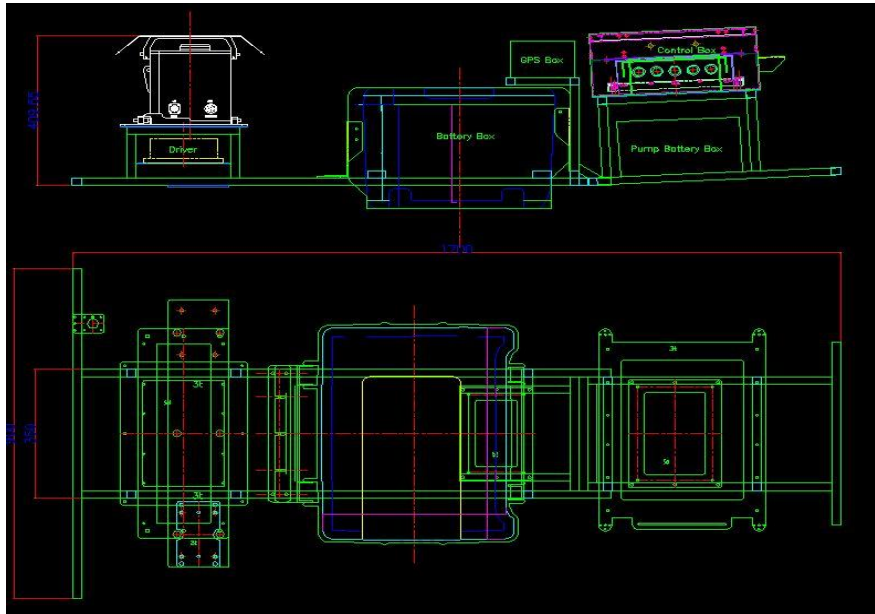
	외장	300cm
	내장	195cm
	외폭	162cm
	내폭	75cm
	튜브 직경	47cm
	중량	40kg
	부력	350kg

A. 무인수상선용 고무보트

RT-80/EM

	공급 전압	24V
	최대 소모 전류	58A
	최대 추력	약 36.2kg
	최대 사용 보트 길이	약 6m

B. 무인수상선용 추진기



C. 무인수상선 상부 프레임 도면

Torpedo ROV		
Index	Value	Units
Length	1550	mm
Diameter	250	mm
Width	560	mm
Height	450	mm
Weight	45	kg
Buoyancy	20	kg

D. 무인잠수정 설계 치수

Tecnadyne Model 300



공급 전압	24V
최대 소모 전류	20A
최대 추력	약 7.7kg
최대 사용 수심	850m

E. 무인잠수정용 추진기

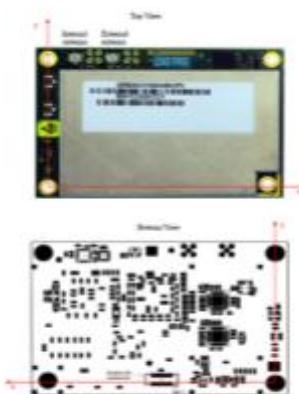
DSP F28377s




CPU	32bit 정수형 C28X Core + 32bit 소수 연산 유닛
연산 능력	200MHz, 200MHz CLA
메모리	RAM : 164kB / FLASH : 1024kB / OTP : 4kB
외부 인터페이스	16bit/32bit 외부 메모리 인터 페이스, 최대 4MB
DMA	6CH
부가 기능	타이머, PWM, ADC 등
GPIO	88개
통신	SCI, SPI, eCAN, mCBSP, I2C
부트모드	Flash, SPI, SCI, eCAN, 내부 RAM 등 16가지
공급 전압	Core : 1.9V, I/O : 3.3V
동작 온도	A 버전 : -40 to 85 degree C S 버전 : -40 to 125 degree C

F. DSP F28377S 제원

AteRx-m OEM

	공급 전압	3.3V
	안테나 공급 전압	3-6V
	최대 안테나 소모 전류	200mA/RF connector
	안테나 감지 전류	<6mA
	잡음 지수	External antenna : 5dB Internal antenna : 4dB
	안테나 게인 범위	External antenna : 10-40dB Internal antenna : 0-20dB
	안테나 입력 임피던스	50ohms
	공급 IP3	0dBm
	동작 온도	-35 to 85 degree C

G. GPS 제원

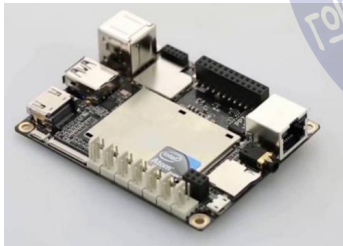
EBIMU-9DOFV3		
	공급 전압	3.3-7V
	소모 전류	40mA (5V 공급 상황)
	동작 온도	-40 to 125 °C
	축가속도 측정 범위	±16G
	비선형성	0.2 %FS
	최대 측정 각속도	250-2000dps
	크기	15.6mm X 18.6mm

H. AHRS 제원

DM4000

공급 전압	9-13.8V
소모 전류	100mA (Transmit)
동작 온도	-20 to 60 °C
RF 데이터 전송속도	Half Duplex 4,800bps
RS-232 데이터 전송속도	2,400bps ~ 19,200bps
주파수 범위	424.7125MHz~424.9500MHz, 447.8625MHz~447.9875MHz
크기	122 X 70 X31 [mm]
송신 출력	10mW
수신 감도	-118dB(12dB Sinad)
송수신 거리	최대 5km

I. RF 송수신기 제원

Latte Panda

CPU	Intel Z8300
메모리	RAM : 4GB
저장공간	eMMC 64GB
USB 포트	USB 2.0*2, USB3.0*1
무선 통신	와이파이, 블루투스 지원
운영체제	Windows 10
기타	Arduino 내장

J. Latte Panda 제원

A63K-G5913



공급 전압	24V
정격 전류	2.8A/Phase
최대 정지 토크	6.3Nm
Step 각	0.72° / 0.36°
Rotor Inertia	4000 $g \cdot cm^2$

K. 스테핑모터 제원

SeaTrac x150



공급 전압	9-28V
소모 전류	6W (Transmit)
동작 온도	-5 to 40 °C
내장 센서	수압, 온도, AHRS
송수신 거리	1km

K. USBL 제원

MTi-30



공급 전압	4.5-34V or 3.3V
소모 전류	500mW
동작 온도	-40 to 85 °C
Standard full range acc	200 m/s ²
Bias stability gyro	18°/h
Output frequency	Up to 2 kHz

L. AHRS 제원

PSH



공급 전압	11-28V
소모 전류	20mA (Transmit)
동작 온도	-20 to 80 °C
정확도	±0.15%FS(RSS)
측정 범위	3bar

M. 수심센서 제원

COP Series



인가 전원	9~18V, 18~36V
출력	30W, 50W, 100W
효율	약 75%
동작 온도	-40 to 85 °C
Switching Frequency	300kHz
Output Tolerance	±2%
Ripple & Noise	1%

N. DC-DC Conveter 제원

