

공학석사 학위논문

중계 임무 수행이 가능한
무인수상선(USV) 연구

A Study on Unmanned Surface Vehicle(USV) performing a
repeater

지도교수 최 형 식

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과
이 상 섭

본 논문을 이상섭의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 유 삼 상 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 황 광 일 (인)

2015년 01월 16일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 개요	1
1.2 연구범위 및 목적	5

2. USV의 기구부 구성

2.1 USV의 선체 설계	9
2.2 추진기 선정 및 배치	10
2.2.1 추진기 용량 선정	10
2.3 USV의 동역학	15

3. USV의 제어 및 항법시스템 구성

3.1 제어시스템 구성	19
3.1.1 Sensor Box	19
3.1.2 Control Box	23
3.1.3 Battery Box	28
3.2 신호처리, 통신 및 전원 구성	30
3.3 복합 GPS 시스템	32
3.3.1 GPS 경위도를 우리나라 경위도로 바꾸는 방법	34

3.3.2 3개의 GPS를 이용한 보정 알고리즘	43
3.4 Control Interface의 연구	44
4. USV의 항법시스템 연구	
4.1 경로 추적 제어(Way-point Tracking Control)	47
4.2 위치 고정 제어(Position Fixing Control)	52
5. USV의 중계 장치 연구 및 성능 시험	
5.1 다중 통신시스템 시험	56
5.2 수중 로봇 간 중계 임무를 위한 USBL 시험	58
6. 결론	
참고문헌	65



List of Tables

Table 1	Research case of the USV	4
Table 2	Specification of the USV system structure	7
Table 3	WMO Sea State Code (Step 2 ~ 4)	10
Table 4	Specifications of the Propulsion modules	14
Table 5	6 degree of freedom motion of the USV	16
Table 6	Specifications of Main GPS	21
Table 7	Specifications of Sub GPS	22
Table 8	Specifications of IMU	23
Table 9	Specifications of the processor(TMS320F28335)	25
Table 10	Specifications of VHF module	27
Table 11	Specifications of the DC-DC	27
Table 12	Specifications of the Lithium polymer battery cell	29
Table 13	Coordinate origin and Scale factor	42
Table 14	Specifications of the TrackLink 1500 system(USBL)	60

List of Figures

Fig. 1 The DELFIM ASC(ASIMOV Project)	4
Fig. 2 Charlie USV(Caccia)	4
Fig. 3 San Diego USV(SSC)	4
Fig. 4 Autonomous Surface Vehicle(CSIRO)	4
Fig. 5 The concept of USV Operating	6
Fig. 6 Unmanned Surface Vehicle(USV)	8
Fig. 7 Concept design of USV hull	9
Fig. 8 Propulsion Module	13
Fig. 9 Body-fixed and Earth-fixed coordinate systems	15
Fig. 10 Sensor system of the USV(Sensor Box)	19
Fig. 11 Main GPS (AsteRx-m)	20
Fig. 12 Sub GPS (LS2003D)	21
Fig. 13 IMU(RTxQ)	22
Fig. 14 Control system of the USV(Control Box)	24
Fig. 15 USV Control Board	26
Fig. 16 Power Board	28
Fig. 17 Battery Box	29
Fig. 18 Communication composition of USV	31
Fig. 19 Power system of USV	31
Fig. 20 Conversion of the GPS latitude and longitude	34
Fig. 21 Geographic coordinates ϕ , λ , h / Geocentric Cartesian X, Y, Z	35
Fig. 22 Bursa-Wolf Transformation Model	38
Fig. 23 Ellipsoid, Geoid, Orthometric height	41

Fig. 24 Relationship between the ellipsoid and the geoid surface side ...	41
Fig. 25 Simulation of complex GPS systems	43
Fig. 26 Control Interface of USV	45
Fig. 27 USV Block diagram	46
Fig. 28 Waypoint tracking with heading control of the USV	47
Fig. 29 Waypoint tracking simulation result	49
Fig. 30 Waypoint tracking experiment result	50
Fig. 31 Waypoint tracking control experiment	51
Fig. 32 Flowchart of Position fixing control	52
Fig. 33 Position fixing control of the USV	53
Fig. 34 Position fixing control experiment result	54
Fig. 35 Position fixing control experiment	54
Fig. 36 The concept of USV performing a repeater	55
Fig. 37 The position of control system for Multi communication test	56
Fig. 38 The result of Multi communication test in the control interface ...	57
Fig. 39 USBL system	59
Fig. 40 USBL performance test	61
Fig. 41 The result of USBL performance test(1)	62
Fig. 42 The result of USBL performance test(2)	62

A Study on Unmanned Surface Vehicle(USV) performing a repeater

Lee, Sang Seob

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Nowadays, USV (Unmanned Surface Vehicle) is gaining a lots of attention on marine research and surveying exploration in costal area. This paper presents an experimental study on USV performing a repeater for mission with AUV (Autonomous Underwater Vehicle) and ROV (Remotely Operated Vehicle). To operate USV and AUV safely, an accurate localization and navigation system are essential. This paper describes an implementation of an autonomous navigation system for a USV performing a repeater. To improve the performance of the propulsion and control USV was selected for the appropriate propulsion module, was equipped precise sensor system. Using a independent battery to avoid the influence of noise generated by the propulsion module and the driver. By applying a VHF communication module and tested at a distance of about 5km. And the performance was confirmed. This USV was applied multi-GPS algorithms to overcome the limitations of GPS errors. And it can control waypoint tracking and position fixing control algorithms using GPS-INS integration, which is designed with three fixed thrusters to flexibly orient and to

maintain at a desired position. Moreover, a repeater mission for limits of AUV is developed and is presented and verified through a number of simulation and experiments.

KEY WORDS: Unmanned Surface Vehicle(USV) 무인수상선; Unmanned Underwater Vehicle 무인잠수정; Waypoint tracking 경로 추적; Position fixing 위치 고정; Navigation system 항법 시스템; Multi communication 다중 통신; USBL(Ultra short baseline) 초단거리 기선



제 1 장 서 론

1.1 개요

위험하거나 불편한 해상작업은 유인선보다는 무인선이 수행하는 것이 적합할 경우가 많다. 특히, 해상조난구조 작업이나 장기간에 걸친 해상경계 및 관측 작업 등은 무인선을 적용할 수 있는 좋은 예이다. 그러나 무인선을 민간분야에서 실용화하기 위해서는 무인선의 운용에 관한 입법조치가 먼저 취해져야한다. 따라서 무인선의 민간분야에서의 많은 적용 가능성에도 불구하고 현재는 응용사례가 드물다.

반면에 무인선을 군사 분야에서 활발히 연구 개발되고 있으며 실전에도 적용되고 있다. 무인선을 비롯한 무인기, 무인차 등으로 구성된 무인체계는 임무수행에 있어 부상, 생포, 또는 사망의 위험을 줄이고 병력의 효율을 높일 수 있다. 또한, 지뢰 및 기뢰 탐지, 정보수집, 목표물 정밀지정, 생화학 방사능 등 위험물질 탐색, 통신 및 정보중계 등 군사적으로 여러 가지 역할을 수행할 수 있다.

최근 첨단 기술의 발달에 따라, 인명피해를 줄이고 다양한 작전을 수행할 수 있는 무인체계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무인체계의 현황과 앞으로의 개발 방향을 알아 보기위해, 군용 무인체계개발에 있어 세계적으로 가장 앞선 미국의 예를 살펴본다. 미국은 2006년 10월 이라크 전쟁에서, 무인 항공기가 작전지원을 위하여 약 40만 비행시간을 기록하였고, 무인차량은 일만 천회 이상 급조폭발장치(Improvised explosive device: IED)에 대처하였으며, 무인해양시스템(무인 잠수정 및 무인선)은 항구의 보안을 담당하였다.

이러한 무인체계의 성공적인 임무수행의 결과에 따라, 미군은 2007년에서부터 2032년까지 향후 25년간의 무인체계의 개발 및 적용을 추진하고 있다. 이에

따라 무인기, 무인차, 무인선 및 무인잠수정 등의 각각의 로드맵과 마스터플랜을 통합미군무인체계 로드맵에 편입하였다. 육군, 해군, 공군의 무인시스템을 유기적으로 묶은 통합로드맵은 향후 무인체계의 개발과 기술의 우선순위와 재원확보에 관한 계획이며, 무인체계의 가장 시급한 임무로서 정찰과 감시, 목표물 확인 및 위치지정, 지뢰 및 기뢰 대응, 화생방 위험물 정찰 등을 제시하였다.(홍신표 등, 2009; Office of the Secretary of Defense, 2007)

무인선은 관제소와 정보를 교환하며 여러 종류의 임무를 수행한다. 특히, 해상 경계, 정찰, 그리고 해상 및 해저 지형탐사 등은 무인선의 중요임무에 속하며, 이러한 임무를 수행하기 위해서는 카메라, 소나 등으로부터 얻어지는 대용량의 정보가 필요하며 통신이 이루어진다.

이러한 무인선의 기본적인 임무 외에 무인잠수정과 연계 임무수행의 중요성도 대두되고 있다. 무인잠수정의 가장 큰 단점인 수중 통신의 어려움과 배터리의 제약으로 인하여 광범위한 바다를 장시간 동안 자동으로 탐색하기는 무리가 있는 상황이다. 따라서 기본적인 USV의 기능을 가지면서 앞서 말한 무인잠수정의 단점을 보완하기 위하여 중계 임무 수행이 가능한 USV의 개발이 필요하다. 무인 잠수정에서 보내는 데이터를 중계하여 육상으로 신호를 보내주는 역할을 하는 USV타입 로봇의 연구가 활발히 진행되고 있다.

그 중 ASIMOV Project에서는 해양환경 조사를 위해 AUV와 USV간의 협력을 통하여 임무를 수행하는 연구 등을 진행하였다.(A. Pascoal et al., 2000)

Caccia는 프로토타입의 Charlie USV를 제작하여 USV의 네비게이션과 경로 계획, 제어에 관해 연구하였다. 이 논문에서는 GPS와 compass 센서를 이용하여 경로 제어에 대해 실험한 후, 효율성과 성능에 대한 분석이 이루어졌다.(Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R. & Bruzzone, G., 2008)

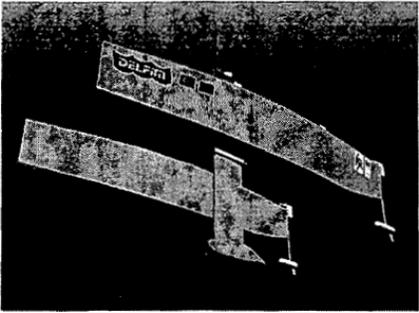
또한 Larson 등은 자율 네비게이션 기능을 가지는 USV인 SanDiego USV를 개발하였다. 이것은 스포츠용 제트보트로 구현되었으며, 센서는 레이더와 카메라가 사용되었다. 그리고 장애물 회피와 경로 계획, 목표물 탐지 등의 자율 운항에 관한 대부분의 기술은 SSC(Space and Naval Warfare Systems Center)에서 개발한 무인 지상차량 기술을 채택하였다.(J. Larson, et al., 2006)

Australia CSIRO에서는 환경 모니터링을 목적으로 하는 ASV(Autonomous Surface Vehicle)를 제작하고 영상을 기반으로 하는 도킹시스템을 개발하였다. 그들은 카메라가 장착된 Starship ASV를 이용하여 도킹을 위한 기본적인 선체 제어와 실시간 영상처리를 기반으로 도킹 대상을 추적, 결합하는 연구를 수행하였다. GPS와 Vision 센서를 사용하여 도킹 제어를 하였고, 목표까지의 접근을 위해 virtual force fields를 이용한 경로 설정 방법을 이용하여 도킹을 수행하였다.(Dunbabin, M., Lan, B. & Wood, B., 2008)

또한, 노르웨이의 NTNU(Norwegian University of Science and Technology)는 Ship Control System 분야에서 활발히 연구를 진행하고 있으며, 다양한 control 알고리즘을 모형선 또는 실제 선박에 적용하여 실험하였다.(Skjetne, R., Smogeli, Ø. & Fossen, T. I., 2004; Fossen, T. I., 1994)

NTNU의 CeSOS(Centre for Ships and Ocean Structures)에서는 해상에서의 선박의 움직임을 모델링할 수 있도록 MSS(Marine System Simulator)라는 Matlab / Simulink Toolbox를 만들었다. MSS의 핵심요소인 Marine GNC Toolbox는 전체 시스템을 Guidance, Navigation, Control의 세 부분으로 모듈화 하여 시스템 설계 및 시뮬레이션을 수행한다. NTNU의 해양 관련 연구실에서는 위와 같이 개발된 MSS Toolbox를 기반으로 Cyber ship II와 같은 모형선박을 이용하여 수조실험과 연구를 수행하고 있다.(Marine Systems Simulator, 2004)

Table 1 Research case of the USV

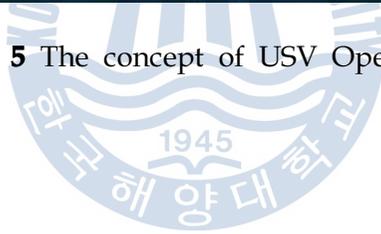
	Figure	Feature / Duty
ASIMOV Project	 <p>Fig. 1 The DELFIM ASC</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해양환경 조사 ▪ AUV와 USV간 연계임무 수행
Charlie USV	 <p>Fig. 2 Charlie USV(Caccia)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GPS 및 Compass 센서 사용 ▪ 경로 계획, 제어
San Diego USV	 <p>Fig. 3 San Diego USV(SSC)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 스포츠용 제트보트로 구현 ▪ 레이더와 카메라 사용 ▪ 장애물 회피, 경로 계획, 목표물 탐지
Australia CSIRO	 <p>Fig. 4 Autonomous Surface Vehicle</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GPS 및 Vision 센서 사용 ▪ Docking 제어 ▪ Virtual force fields를 이용한 경로 설정

1.2 연구범위 및 목적

본 논문에서는 경로 추적 제어, 동적 위치 제어 등 기본적인 무인수상선(USV)의 기능을 갖고 AUV나 ROV 등 수중 로봇의 중계기로서의 임무 수행에 적합한 무인수상선(USV)의 설계 및 제어에 대한 연구를 수행하였다. 무인수상선(USV)의 추진 및 제어 성능을 향상시키기 위해 목표 최고 속도를 정하였고 선체의 저항을 구하여 목표 최고 속도에 적합한 용량의 추진체 3개를 선정하여 각각 Surge 방향과 Sway 방향으로 배치하고 GPS와 IMU로 이루어진 정밀 센서 시스템을 구현하였다. 추진체 및 드라이버에서 발생하는 노이즈의 영향을 받지 않도록 독립된 배터리를 사용하여 센서 및 제어시스템에 전원을 공급하였고 2개의 소형 프로세서를 이용하여 간소화된 제어시스템을 구현하였다. 실제 운용 환경을 고려하여 5km 정도의 거리에서도 통신이 가능한 VHF 통신모듈을 적용하여 약 5km의 거리에서 시험하여 성능을 확인하였다. 또한 GPS의 오차 한계를 극복하고자 좌표 변환 및 다중 GPS 알고리즘을 적용하였으며 경로 추적 및 동적 위치 제어, 장애물 회피 기능 외에 수중 로봇이 갖는 수중 통신 문제와 배터리 운용시간 등의 한계 극복을 위한 중계기로서 USBL을 이용한 수중 로봇의 위치 정보 수신 및 제어, 수중 LED 통신을 이용한 수중 로봇 제어 등의 기능을 적용하였다. 또한 실제 해역의 환경을 고려하여 운용할 수 있도록 설계하였으며 실제 해역에서의 시험 및 운용을 통해 성능을 입증하였다.



Fig. 5 The concept of USV Operating



제 2 장 USV의 기구부 구성

USV의 선체는 FRP를 이용하여 가벼움과 높은 강도, 제작의 편리성을 가지고 유선 타원형의 날렵한 형상으로 제작되었다. Fig. 6 과 같이 선수부터 선미까지 이어지는 유선형의 날개는 조파 및 조와의 영향을 줄여 Rolling 과 Pitching 에 대응하기 위한 방편으로서 설계되었다. 날개부분으로 변화가 심한 바다 위에서 안정된 자세 유지를 통해 제어의 용이함을 더 했고 추진 모터를 비롯한 스러스트 역할의 두 개의 모터는 선체를 중심으로 각각 전후로 50cm 간격으로 배치되었다. 선체의 유체역학을 해석하여 Surge 및 Sway 방향으로 USV를 제어하기 위한 충분한 추력이 계산되었다.

Sensor Box, Control Box, Battery Box, Driver, Motor 등의 기본 구성장치를 안정적으로 설치할 수 있고 전방위 Sonar 계측 시스템, USBL, LED Comm. Housing 등의 장비를 추가로 구성할 수 있도록 설계하였다. USV 선체의 제원은 아래 Table 2 에 설명하였다.

Table 2 Specifications of the USV system structure

Hull structure specifications	1.9m × 0.9m × 0.7m Max. Speed : 4 knots
Propulsion module	Endura C2 50 : 1 EA Endura C2 30 : 2 EA
Control system module	Processors : TMS320F28335 VHF module : RD400
Material	Fiber Reinforced Plastic(FRP)
Sensors	GPS_AsteRX1 IMU_MTI 9 Channel OAS(Sonar)



Fig. 6 Unmanned Surface Vehicle(USV)

실제 해역에서의 원활한 이동과 Surge 방향의 자세제어를 위해 X축 방향으로 1개의 Endura C2 50 추진기를 장착하였고 Yaw 각 및 Sway 방향 제어를 위해 2개의 Endura C2 30 추진기를 Y축 방향으로 장착하였다.

2.1 USV의 선체 설계

선체의 모습은 그림3과 같으며 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic : 유리 섬유 강화 플라스틱)라는 불포화폴리에스테르수지를 적층하여 경화 가공하여 선체를 구성했으며 고내식성의 FRP 매우 가벼우면서도 강도가 강하고 단열성 및 내후성 또한 우수하다. 선체는 선수-선미 간 길이 1.9m, 폭 0.9m, 높이 0.3m의 타원형으로서 동일한 크기의 구조물 두 개로 이루어졌으며 상부 측에는 아크릴판으로 덮을 수 있도록 설계하여 해수의 유입을 차단하며 내부를 볼 수 있게 하였다.

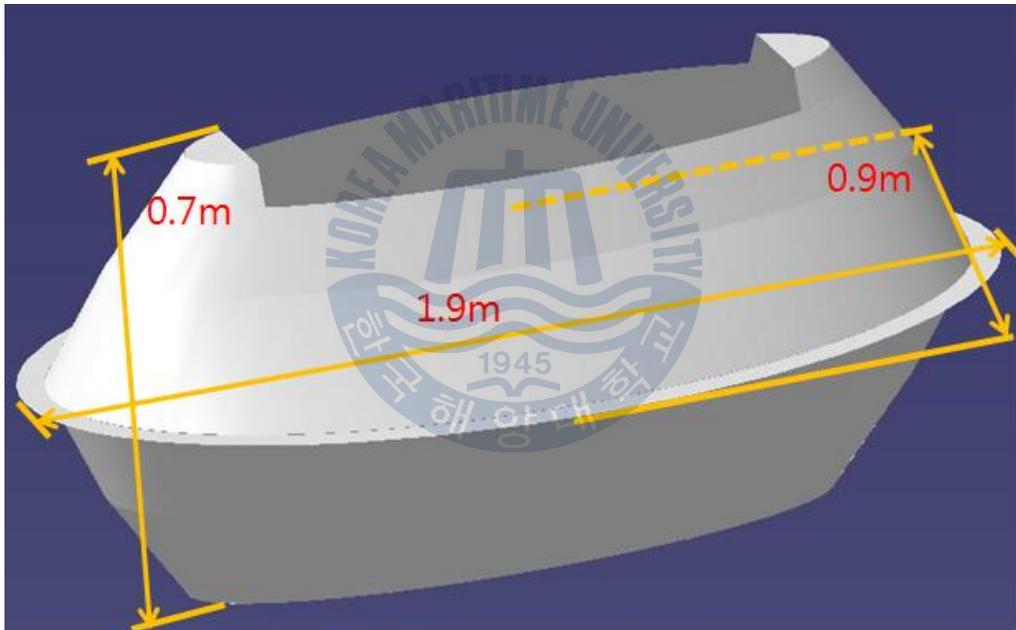


Fig. 7 Concept design of USV hull

2.2 추진기 선정 및 배치

2.2.1 추진기 용량 선정

USV의 운용이 가능한 최대 환경을 0.5 m ~ 1.25 m 의 파고 상태를 갖는 Sea State 3 으로 가정하고 약 3노트의 조류가 흐르는 상황으로 가정하였다. 이러한 상황을 극복하기 위하여 4노트(2.572m/s)의 추력을 낼 수 있는 추진체를 보트용 전동 선외기에서 선정하였다. 아래 Table 3 는 Sea State 3 에 대한 설명을 간단히 나타낸 것이다.

Table 3 WMO Sea State Code (Step 2 ~ 4)

WMO Sea State Code	Wave Height	Characteristics
2	0.1 to 0.5 metres (3.9 in to 1 ft 7.7 in)	Smooth(wavelets)
3	0.5 to 1.25 metres (1 ft 8 in to 4 ft 1 in)	Slight
4	1.25 to 2.5 metres (4 ft 1 in to 8 ft 2 in)	Moderate

선체가 나아가는 데에 받는 항력보다 큰 추력을 낼 수 있는 추진기를 선정하기 위해 항력계산이 필요하다. 추진기 선정을 위한 선체의 항력계산은 물에 잠기는 선체의 침수면적을 이용하여 항력을 구하고 그 항력을 충분히 이길 수 있는 출력으로 모터를 선정한다. 즉, 본 항의 계산은 선정된 모터가 선체의 항력을 능가하는 것을 목표로 두고 해석한 것이다.

물속에서 선체가 받는 항력을 이겨 내어 목표로 하는 4노트의 추진속도를 얻기 위해 우선적으로 선체가 받는 항력의 계산이 필요하다.(이창호 & 이수룡, 2009)

항력은 전저항(R)으로 표기하며

$$R = R_f + R_r + R_a \quad (1)$$

이다. 여기서,

R_f : Frictional resistance

R_r : Residual resistance

R_a : Air resistance

이다.

선체가 저속 운행시 전저항은 마찰저항이 80%, 잉여저항이 20%로 보고, 고속 운행시 일반적으로 마찰저항의 두 배를 전저항으로 계산한다. 본 연구에서는 USV의 중계 임무 특성을 고려하여 저속 운행 상황을 적용한다.

마찰저항은 아래와 같다.

$$R_f = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_f \quad (2)$$

여기서,

ρ : Specific gravity of sea water

S : Area of watted surface

V : Velocity

를 나타내며, C_f 는 항력계수로서 아래와 같다.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (3)$$

R_n 은 레이놀즈수로 아래와 같다.

$$R_n = \frac{VL}{\nu} \quad (4)$$

V : Velocity

L : Length of ship

ν : Coefficient of kinematic viscosity

식 (2), (3), (4) 에 의해서, 레이놀즈수, 항력계수, 마찰저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R_n = 3.079623077 \times 10^6$$

$$C_f = 3.722710597 \times 10^{-3}$$

$$R_f = 18.075 \text{ kgf}$$

잉여저항 등을 무시하였을 때 선체가 목표로 하는 4노트의 속도를 얻기 위해서는 약 20 kgf 이상의 저항을 이겨내야 한다. 따라서 22.7 kgf의 추력을 낼 수 있는 Endura C2 50을 선정하였다. 모습은 아래 Fig. 8 과 같으며 Table 4 는 추진체의 제원이다.



Fig. 8 Propulsion Module

Sway 방향 추진체의 용량은 같은 모델군의 Endura C2 30을 사용하였고 출력 산정식은 위와 동일하며 선체의 길이만 다르게 적용하면 식 (2), (3), (4) 에 의해서, 레이놀즈수, 항력계수, 마찰저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R_n = 1.538461538 \times 10^6$$

$$C_f = 4.277966 \times 10^{-3}$$

$$R_f = 20.7703 \text{ kgf}$$

따라서, 13.6 kgf의 추력을 낼 수 있는 Endura C2 30을 2기 장착하였다. 추진체의 제원은 아래 Table 4 와 같다.

Table 4 Specifications of the Propulsion modules

Model	Endura C2 50	Endura C2 30
Max. Thrust	50 파운드 (22.7 kgf)	30 파운드 (13.6 kfg)
Max. Current	42 A	30 A
Input Voltage	12 VDC	12 VDC
Max. Boat Length	20 피트 (약 6 m)	14 피트 (약 4.2 m)



2.3 USV의 동역학

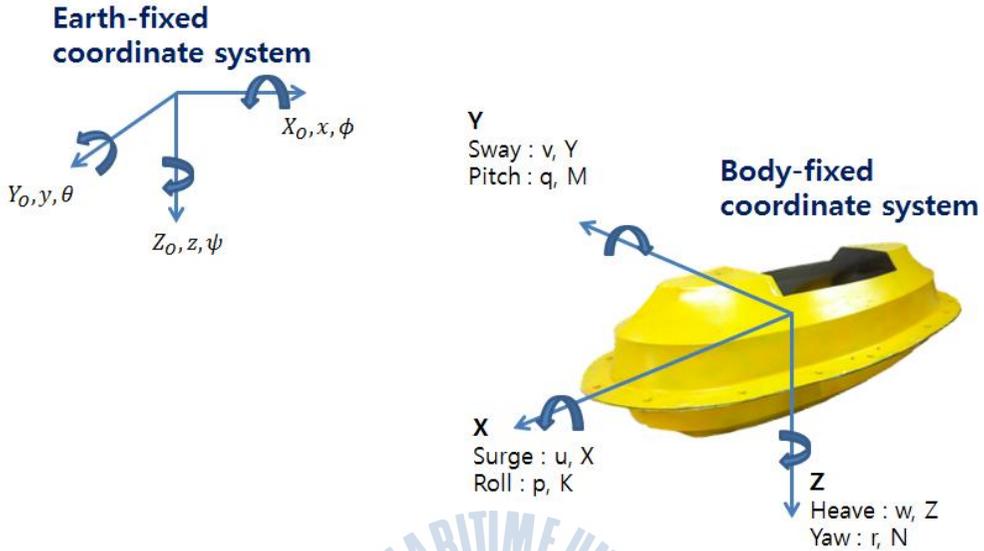


Fig. 9 Body-fixed and Earth-fixed coordinate systems

운동체는 6자유도의 운동방정식에 의해 설명된다. 그림과 같이 동체 고정 좌표계(Body-fixed coordinate system)인 X, Y, Z 와 지구 고정 좌표계(Earth-fixed coordinate system) X_E, Y_E, Z_E 를 정의하여야 한다. 일반적으로 동체 고정 좌표계에서 원점은 무게 중심과 일치시킨다. 운동체를 위한 동체 축에서 X 는 길이 방향의 축, Y 는 횡 방향의 축 그리고 Z 은 수직 방향의 축으로 정의한다. 동체 고정 좌표계에서의 운동은 지구 고정 좌표계에 관하여 표현한다.(최영수, 정경민, 이성욱, 정승호, 2006)

지구 자체의 공전과 자전에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고 운동체의 속도에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 지구 고정 좌표계는 관성 고정 좌표계(Inertial-fixed coordinate system)라고도 한다. 따라서 운동체의 위치와 자세는 관성 고정 좌표계를 통해 표현하며, 운동체의 선형 속도와 각 속도는 동체 고정 좌표계에 의해 표현된다.

Table 5 6 degree of freedom motion of the USV

Motion of 6 D.O.F	Force and moment	Linear and angular velocity	Position and Euler angles
Motion in the x-direction (surge)	X	u	x
Motion in the x-direction (surge)	Y	v	y
Motion in the x-direction (surge)	Z	w	z
Rotation about the x-axis (roll)	K	p	ϕ
Rotation about the x-axis (roll)	M	q	θ
Rotation about the x-axis (roll)	N	r	ψ

지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 오일러 각은 기준 좌표계 즉, 본 논문에서 지구 고정 좌표계를 각 축에 대하여 3번 회전시켜 동체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로 회전은 Yaw(ψ), Pitch(θ), Roll(ϕ)의 순으로 정한다. 오일러 각의 경우 동체의 자세가 수직에 가까워지면 자세를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있으나, USV 같은 선박의 경우 수직에 가까운 운동이 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다고 판단하여 채택하였다.(Myring, D. F., 1976)

또한, 여기서 USV는 종 방향과 횡 방향으로 안정적인 진폭을 갖는다고 가정하고 Roll, Pitch에 대한 동역학 해석은 무시한다. 마찬가지로 USV가 $Z=0$ 으로 수면에 떠 있기 때문에 Heave에 대한 동역학 해석 또한 무시한다.

그 결과, 수평면에서 운동체는 3자유도 운동을 갖는 모델이 된다. 3자유도

USV의 운동은 다음 식의 벡터들로 묘사할 수 있다.

$$\eta = [x, y, \psi]^T \quad (5)$$

$$v = [u, \nu, r]^T \quad (6)$$

여기서 (x, y) 는 지구 고정 좌표계에서의 평면 위치이고, ψ 는 선체의 방위각을 나타낸다. 그리고 (u, ν) 는 동체 고정 좌표계에서의 선 속도이며 r 은 회전 속도를 나타낸다.

지구 고정 좌표계와 동체 고정 좌표계 사이의 병진 속도의 좌표 변환은 아래 식 (7) 과 같이 표현된다.(Fossen, T. I., 1994)

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (7)$$

동체 고정 좌표계의 원점은 선체의 기하학적 중심(CP)에 있으며 선체가 좌우대칭이므로 무게중심(CG)는 X축 선상에 위치하게 된다. 그리하여 3자유도 비선형 동역학 방정식은 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= X \\ m[\dot{\nu} - \wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= Y \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_g(\dot{\nu} - \wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= N \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 수직 운동과 고차 감쇄 항을 무시하고 단순화를 위해 Surging 과 Yawing을 고려하면 3자유도 비선형 방정식을 아래 식과 같이 선형 방정식으로

간략하게 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_\nu & mx_g - Y_r \\ 0 & mx_g - N_\nu & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\nu} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_\nu - Y_r \\ 0 & -N_\nu - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \nu \\ r \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

m : Mass of vehicle

$X_u, Y_\nu, Y_r, N_\nu, N_r$: Added mass and moments

$X_u, Y_\nu, Y_r, N_\nu, N_r$: Hydrodynamic coefficients

x_g : Distance of the center of gravity along body axis

X, Y : Generalized external forces

N : Generalized external moments

위 식에 따르면 USV 의 유연한 Surge, Sway, Yaw 제어를 위해서 3 개의 추진체가 필요하며 추진체의 배치는 위에서 언급한 바와 같은 배치가 적합하다.

제 3 장 USV의 제어 및 항법시스템 구성

3.1 제어시스템 구성

3.1.1 Sensor Box

USV의 항법시스템 구축을 위해서는 GPS 및 IMU 등의 센서가 필수적으로 장착되어야 한다. 하지만 GPS와 IMU 센서는 노이즈에 취약하기 때문에 추진기 및 배터리 등에서 발생할 수 있는 노이즈로부터 보호하기 위하여 Control Box와는 별도로 제작하여 최대한 영향을 받지 않는 위치에 배치하였다. Sensor Box의 내부 구성은 Fig. 10 과 같다.

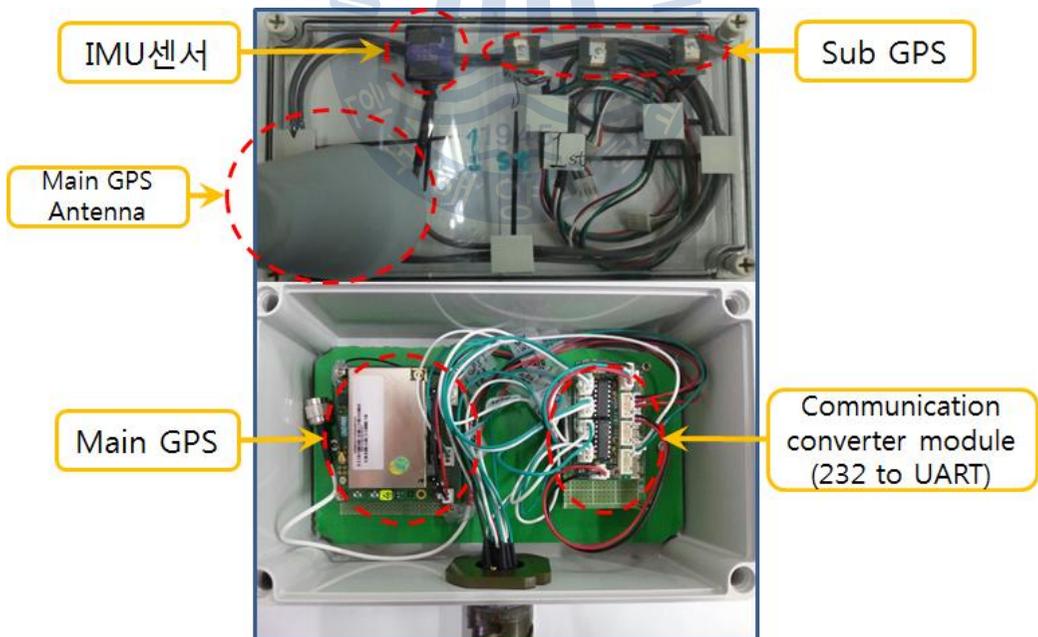


Fig. 10 Sensor system of the USV(Sensor Box)

(1) GPS

GPS란 Global Positioning System의 약자이며, 미국에서 현재위치 및 자동차, 선박, 항공기 등의 항법 장치 사용을 목적으로 쏘아 올린 인공위성을 이용하여, 현재 위치를 계산할 수 있는 시스템이다. 대역에 따라 L1, L2로 나누어지며, 일반적으로 사용 가능한 대역은 L1 대역이며 위치 오차가 10 ~ 20 m 정도 된다. L2 대역은 군사 및 정밀 측위용 대역으로서 일반사용자는 L2 대역의 위성 수신을 하지 못한다.

GPS 수신기가 각 위성의 미약한 신호를 받아 신호를 증폭하여 중앙 처리장치가 신호를 분석, 현재 위치를 최대한 빠르고 정확하게 계산을 하는 GPS 수신장치가 현재 많이 보급되어 있으며, 현재는 군사용만이 아니라 민간용으로도 많이 활용되고 있다.

본 연구에서는 USV의 원해 임무 수행 중 발생할 수 있는 다양한 사고에 대비하여 고가의 고성능 GPS인 AsteRx-m을 Main GPS로 선정하였고 Sub GPS로는 저가의 보급형 GPS인 LS2003D를 선정하여 복합 GPS 시스템을 개발하였다. 복합 GPS 시스템에 대해서는 뒤에 자세한 설명을 한다. Main GPS와 Sub GPS의 사진과 제원은 아래 Fig. 11, Fig. 12, Table 6, Table 7 과 같다.



Fig. 11 Main GPS (AsteRx-m)

안테나의 경우 별도의 주문 제작으로 Teflon coating을 이용한 방수(3000ft 까지 방수 가능) 패시브 타입의 안테나이기에 별도의 신호 변환 장치 필요하다.

Table 6 Specifications of Main GPS

Output	Latitude	
	Longitude	
	Altitude	
	Time	
Specification	Position Accuracy(Horizontal)	0.5 m
	Position Accuracy(Vertical)	0.9 m
Interfacing	Digital interface	RS-232
	Operating voltage	3.3VDC \pm 5%
	Power consumption	< 1W

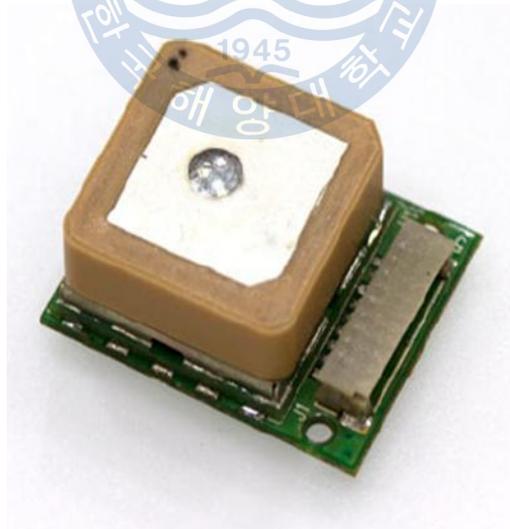


Fig. 12 Sub GPS (LS2003D)

Table 7 Specifications of Sub GPS

Output	Latitude	
	Longitude	
	Altitude	
	Time	
Specification	Position Accuracy(Horizontal)	2.5 m
	Position Accuracy(Vertical)	.
Interfacing	Digital interface	RS-232
	Operating voltage	3 ~ 4.3 VDC
	Power consumption	< 0.3 W

(2) IMU

본 연구에 사용된 RTxQ는 9축 관성 센서를 내장한 스마트 센서로서 6자유도 관성 측정 장치(IMU) 또는 자세/방향 참조 시스템(AHRS)으로 자동차, 항공기와 같이 이동하는 물체의 위치, 자세, 속도 등의 정보를 제공하는데 사용될 뿐만 아니라 로봇, 기계장치 및 사람의 움직임을 측정하는데 사용할 수 있는 센서이다. 16 Bit ADC를 통해 디지털 변환 및 필터링 된 관성 데이터를 쿼터니언 / 오일러 3차원 연산 알고리즘과 다중모드 칼만필터를 통해 높은 신뢰성의 Roll, Pitch, Yaw 각도를 제공하며, 중력성분이 소거된 항법좌표계에서의 X, Y, Z 가속도 성분의 출력을 지원한다.



Fig. 13 IMU(RTxQ)

Table 8 Specifications of IMU

	Minimum	Normal	Maximum	Unit
Operating voltage	4.0	5.0	9.0	VDC
Current consumption	21	30	35	mA
Temperature range	-40	25	85	°C
Axis acceleration range		±2		G
Nonlinearity		0.2		%FS
Max. angular velocity	250	500	2000	°/sec
Altitude computation		256		Hz
Output settling time	30	80	150	ms

3.1.2 Control Box

USV의 Control Box는 크게 Control Board, VHF Communication Module, Battery, Power Board, ON/OFF Switch로 구성되어 있다. Control Board는 Main processor와 Sensor processor으로 나누어지는데 Main processor은 Main GPS와 IMU의 데이터를 이용하여 경로 추적 및 DP 제어를 위해 모터를 구동하고 사용자와 통신하기 위한 역할을 수행한다. Sensor processor은 Sub GPS인 LS2003D로 구성된 복합 GPS 시스템의 보정 알고리즘을 구동한다. 사용자로부터 멀리 떨어진 곳에서의 임무수행을 위하여 장거리통신이 가능한 VHF Communication Module을 사용하였고 추진체 구동시 발생할 수 있는 전원 노이즈로부터 Control Box와 Sensor Box에 공급하는 전원을 보호하기 위하여 별도의 Battery를 배치하였고 센서와 모듈 등에 알맞은 구동전압을 출력 및 공급하기 위하여 DC/DC를 적용한 Power Board를 제작하여 사용하였다.

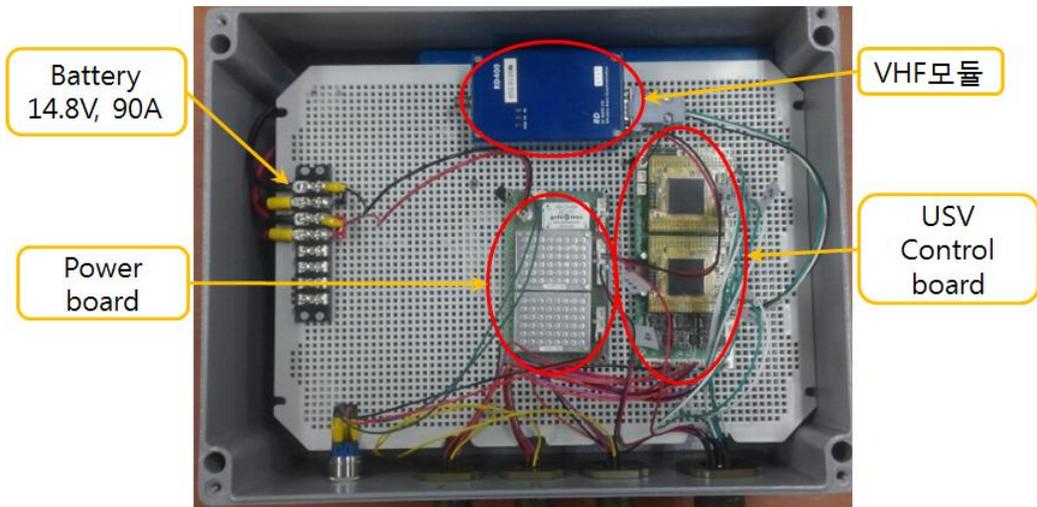


Fig. 14 Control system of the USV(Control Box)

(1) USV Control Board

USV의 메인제어와 센서데이터 수집을 위해 TMS320F28335 모듈을 사용하였다. 모듈에 탑재된 TMS320F28335 칩은 Texas Instruments사의 고성능 MCU 계열인 Delfino™ 계열에 속해 있으며, 소수형 데이터를 하드웨어적으로 고속 처리할 수 있는 FPU(Floating-Point Unit)와 데이터 처리에서 CPU의 부담을 줄여 줄 수 있는 DMA(Direct Memory Access)를 내장하고 있다. 최대 150MHz/150MMACS의 연산능력을 가지고 있으며, 전용 명령어를 통해 최대 300MFLOPS의 소수형 데이터 처리가 가능하다. 또한, 16채널의 12Bit ADC(최대 12.5MSPS)와 주변회로들(Enhanced Peripherals, EPWM / ECAP / EQEP), SCI / SPI / I2C / CAN / McBSP 통신포트들을 갖추고 있으며, 16Bit 혹은 32Bit로 운용 가능한 외부 메모리 인터페이스를 내장하고 있다. 또한 프로그래밍에 사용된 Code Composer Studio는 TI사에서 마이크로프로세서를 개발하기 위한 소프트웨어 툴로, 컴파일러, 소스 코드 에디터, 프로젝트 빌드, 디버거, 프로파일러, 시뮬레이터 등의 다양한 기능을 지원한다. 쉽게 운용 알고리즘을 교체할 수 있기 때문에 Control Board로 구성하였고 TMS320F28335 모듈의 제원과 Control Board의 사진은 다음과 같다. Control Board는 크게 Main GPS 및 IMU의 데이

터 수신 및 사용자간 통신과 추진체를 제어하는 Main Processor, 복합 GPS 시스템을 구동하는 Sub Processor, 추진체에 알맞은 구동신호로 변환시키는 DAC / Level shift로 구성되어 있다.

Table 9 Specifications of the processor(TMS320F28335)

Parameter	Value
CPU	32bit Integer C28X Core + 32bit FPU
Computing ability	150MHz / 150MMAC / 300MFLOPS
Memory	RAM : 68KByte / OTP : 2KByte / Flash : 512KByte
External interface	16bit/32bit EMIF, Max 4MByte
Timer	32bit Cpu Timer 3EA / 8bit Watchdog Timer 1EA / 32bit CAP Timer 6EA /32bit QEP Timer 2EA / 16bit PWM Timer 6EA
PWM	PWM 12CH (ePWM 6EA, 6.67ns) HRPWM 6CH (Each ePWMxA, 150psec) APWM 6CH (eCAP module -> APWM mode)
ADC	12bit / 16 CH / Max 12.5MSPS
GPIO	88 EA
Communication	SCI 3CH / SPI 1CH / eCAN 2CH / McBSP 2CH / I2C 1CH
Voltage	Core : 1.9V, I/O : 3.3V
Temperature range	A : -40℃~85℃ / S : -40℃~125℃

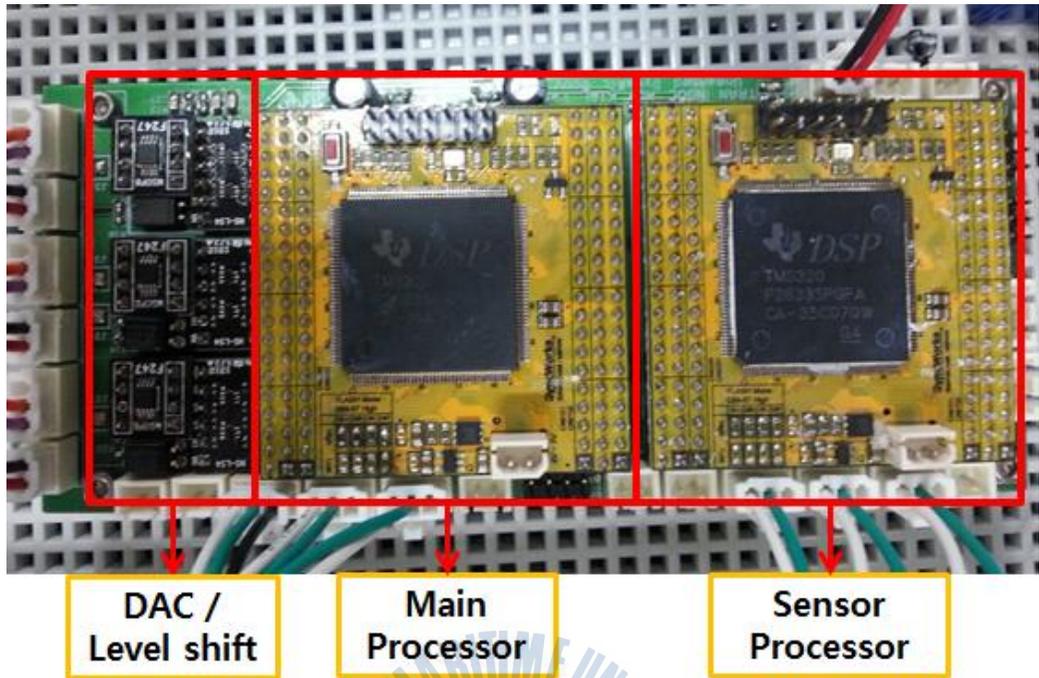


Fig. 15 USV Control Board

(2) VHF Communication Module

아래 Fig. 16 은 사용자 컴퓨터로부터 USV에 임무전달과 위치 및 상태 등의 데이터 수신을 위한 VHF(Very High Frequency) Communication Module이다. UHF 대역의 데이터 전송용 무선기기로서 무선국 허가를 득하여 산업용 데이터 통신에 사용할 수 있도록 제작된 기기이다. 각종 단말기와 RS-232C로 연결하여, 각종 제어 등의 용도에 사용한다. 본 연구에서는 장거리에서의 임무 수행을 가능하게 하고 USV의 정보를 사용자 컴퓨터로 전송하여 USV의 상태 및 센서의 데이터를 실시간으로 확인 및 제어 할 수 있다. VHF Module의 통신 주파수 대역은 450~470MHz이며 통신거리는 최저사양 안테나를 사용했을 경우 최대 5km이다. VHF Module의 자세한 제원은 Table 10 과 같다.

Table 10 Specifications of VHF module

Parameter	Value
Frequency range	450MHz ~ 470MHz
RS-232C data rate	2,400bps ~ 19,200bps
DTE Interface	RS-232C
Temperature range	-20℃ ~ +60℃
Service area	MAX 20km(With 9dB Yagi ANT)
Input power	DC 12V Constant
Input current	1.0A (Transmit) / 60mA (Normal)
Size	118mm×60mm×32mm

(3) Power Board

1차적으로 배터리에서 공급되는 전원을 DC/DC를 이용하여 각 부품들에 맞는 전원을 공급하였다. USV의 제어시스템에 사용된 전압 변환 장치의 사양은 Table 11 과 같다.

Table 11 Specifications of the DC-DC

	COP30S-12-12	COP30S-12-5	LS3-12-033
Input	9 ~ 18 V	9 ~ 18 V	9 ~ 18 V
Output(V)	12 V	5 V	3.3 V
Output(I)	2 A	5 A	0.7 A
Efficiency	82 %	78 %	73 %
Operating Temperature	-40℃ ~ 85℃	-40℃ ~ 85℃	-20℃ ~ 70℃

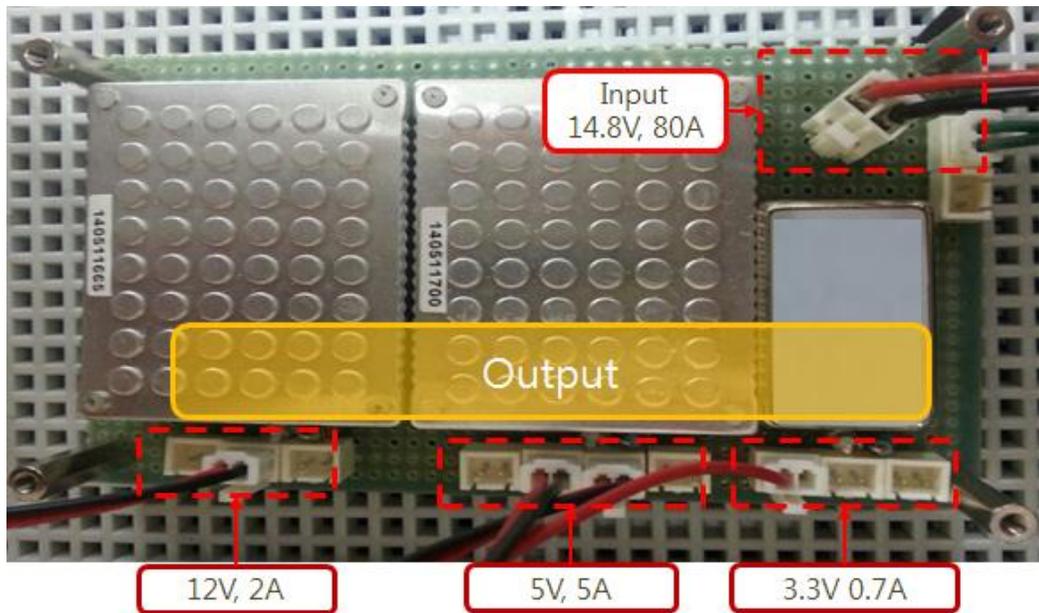


Fig. 16 Power Board

3.1.3 Battery Box

USV의 장시간 임무수행을 위해서는 대용량의 에너지원이 필요하다. Sensor Box 및 Control Box의 전원 공급용 배터리와 추진체 전원 공급용 배터리는 리튬폴리머 배터리 셀을 이용하여 제작하였고 각각의 소모 용량과 약 24시간의 운용시간을 고려하여 14.8V 80Ah / 14.8V 480Ah 로 선정하였다. Fig. 17 은 방수 및 휴대가 가능하도록 방수방진 케이스를 이용하여 만든 추진체 전원 공급용 배터리의 모습이다. 원재료가 되는 배터리셀의 제원은 아래 Table 12 와 같다.



Fig. 17 Battery Box

Table 12 Specifications of the Lithium polymer battery cell

Nominal Voltage		3.7V
Max. Charge Voltage		4.2V
End of Discharge Voltage		2.75V
Rated Capacity		40A
Continuous Discharge Current		20A(5C)
Max. Discharge Current		400A(10C)
Internal resistance		$\leq 18\text{m}\Omega$
Weight		760g
Cell Dimension	Length	3200mm
	Width	120mm
	Thickness	10mm

3.2 신호처리, 통신 및 전원 구성

USV에서 RS-232 통신을 사용하는 장치는 Main GPS, Sub GPS, IMU, VHF module 이다. 추진체 구동을 위해서는 0~5V 사이의 아날로그 신호를 발생시켜서 Driver에 입력해야 한다. 이 부분에 SPI 통신을 이용하는 Digital Analog Converter, TLV5616을 사용하였다.

SPI 통신은 시리얼 방식의 주변장치 인터페이스이다. 근거리용 직렬통신 규격으로 MOSI, MISO, SCK, /SS 4개의 통신선을 사용하는 고속 동기식 직렬통신 방식이다. 통신의 구성은 Master 와 Slave 로 나뉘는데 Master 는 꼭 하나만 있어야 하며, Slave 는 여러 개로 구성될 수 있다. 따라서 3개의 추진체를 사용하는 USV 시스템에서 3개의 DAC로 제어가 가능하다.

복합 GPS 시스템의 보정 GPS 데이터를 수신하기 위한 Sub Processor 와 Main Processor 간의 통신에는 전송속도가 빠른 CAN 통신을 이용하였다. CAN 통신은 시스템 내에서 호스트 컴퓨터 없이 마이크로 컨트롤러나 주변 장치들이 서로 통신하기 위해 설계된 표준 통신 규격으로 2개의 선으로 여러 ECU를 병렬로 연결하여 정보교환을 할 수 있다. USV의 통신 구성은 Fig. 18 과 같다.

전장부에 사용된 배터리는 14.8V 80Ah로 1개의 배터리를 이용하여 전장부에 전원을 공급하였다. 배터리의 특성상 전원을 사용할수록 전압이 떨어진다. 안정적으로 Sensor 및 Controller에 전원을 공급하기 위해 DC/DC를 거쳐 전장부에 전원을 공급하였다. VHF Module의 경우 12V 구동이기 때문에 30W급 12-12 DCDC를 통하여 전원공급을 하였고, 전장부의 전원은 30W급 12-5 DCDC로 연결하여 IMU, GPS, Controller에 5V를 공급하였다. 그리고 Sub GPS의 구동 전원은 3.3V여서 3W급 12-3.3 DCDC를 이용하였다.

추진체의 전원 공급은 14.8V 480Ah 의 용량으로 방진방수케이스를 이용하여 제작한 배터리를 이용하였다. 추진체는 정격전압 12V의 DC 모터가 방수케이스에 내장된 모듈이다. 하지만 정격보다 높은 14.8V로 배터리 전압을 선정하여 배터리 사용 중 출력 전압이 떨어질 경우에도 추진체가 안정적인 추력을 낼 수 있게 하였다. USV의 전원 구성은 Fig. 19 과 같다.

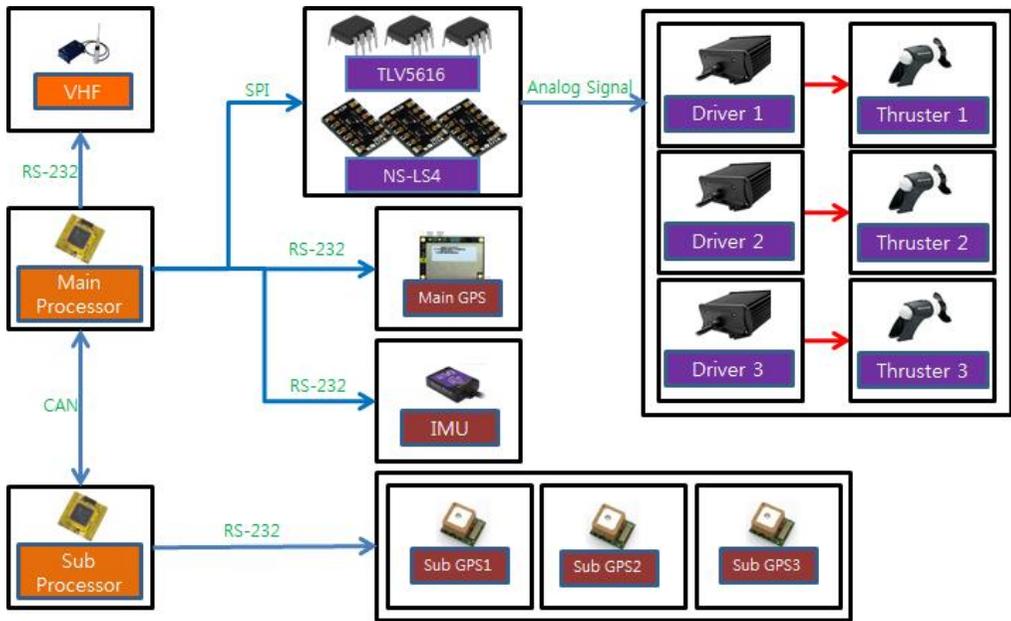


Fig. 18 Communication composition of USV

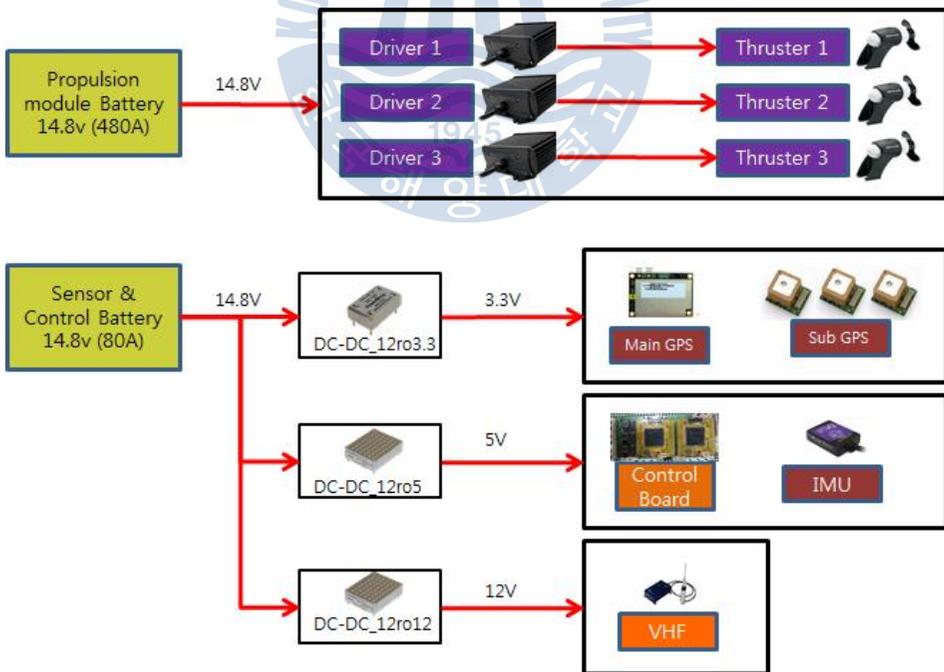


Fig. 19 Power system of USV

3.3 복합 GPS 시스템

GPS는 하늘에 떠 있는 24개의 GPS 위성을 이용한다. 이 위성들은 지구 주위를 일정한 궤도와 속도로 공전하고 있다. 이 위성들이 지표면을 향해 전송하는 전파에 의해 지구의 지표면의 GPS 수신기는 자신의 위치를 특정할 수 있다. 그러나 이러한 과정을 거치는 동안 수많은 요인에 의해 위치정보에 오차가 포함된다. 우선 GPS 위성은 정해진 궤도를 일정한 속도로 공전해야 하나 공전하는 궤도나 속도의 정확성에 한계가 있으므로 지상의 제어센터에 의해 수정이 이루어져야 한다. 이때 오차를 수정하는 단계에서 수정된 궤도를 공전하는 위성과 수정되기 전의 궤도 정보를 가지고 있는 GPS 수신기 간의 정보의 차이에 의한 오차가 발생 할 수 있다. 또한 GPS 위성이 전송하는 전파가 위성에서부터 지표면의 GPS 수신기에 도달할 때까지 지구의 대기권을 지나게 되는데 이때 대기의 상태에 따라 전파의 회절과 같은 현상으로 인하여 오차가 발생한다. 회절된 전파는 위성과 GPS 수신기 간의 실제 거리보다 더 먼 거리를 이동하여 도착하므로 정확한 거리의 측정에 방해가 된다. 이러한 오차들은 GPS 전파의 정보에 의해 어느 정도는 보정될 수 있으나 보다 정확한 위치를 얻기에는 부족하다. 마지막 단계로 GPS 전파가 수신기에 도달할 때 GPS 수신기 주변의 지형이나 건물들에 의해 오차가 발생된다. 전파는 지형이나 건물에 의해 가려져 GPS 수신기에 도달하기 어려울 수도 있으며 건물에 의해 전파가 반사될 경우 수신기에 직접 수신된 전파와 반사된 전파가 중첩되어 수신하게 되어 정확한 위치값을 산출하는데 어려움을 겪게 된다. 하지만 본 연구에서는 아무런 장애물이 없는 해상에서 운용되기 때문에 주변 지형이나 건물들에 의한 오차는 없다고 본다.

GPS 수신기의 자체적인 성능도 정확도에 영향을 미치게 된다. 저가의 GPS 수신기는 정확도가 떨어지는 시계를 사용하여 고가의 정확한 시계를 이용하는 GPS 수신기 보다 위치의 정확도가 떨어질 수 있다. GPS 위치정보의 정확성을 떨어뜨리는 원인은 아주 다양하며 이 원인들이 복합적으로 작용하여 오차를 만들어 내게 된다.(박은성, 김기용, 성동수 & 이건배, 2014)

따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 요인들로 인한 오차를 최소화하여 높은

위치 정확성을 보이는 고가의 GPS에 버금가는 정확성과 신뢰성을 갖는 저가형 복합 GPS 시스템을 개발하였다.

복합 GPS 시스템 개발에 사용한 GPS는 LS2003D이며 NEMA0183 중에서 GPGLA(Global Positioning System Fix Data)를 과싱하여 사용하였다. 여기서 GPGLA는 시간, 위치 정보, 신호를 획득한 위성 개수, 고도 등의 정보를 가지고 있다. 데이터의 신뢰도는 GPS 수신기의 위치나 신호를 획득하는 위성의 개수에 따라 결정되는데 수신기의 위치는 주변에 건물이나 장애물이 없는 평탄한 지형이나 높은 건물 위에 설치할수록 더욱 많은 위성의 신호를 획득한다. 이렇게 보다 많은 위성에서 신호를 받을수록 데이터의 신뢰도가 높아지기 때문에 위성의 개수를 늘리는 노력이 필요하다. 하지만 이와 같은 노력으로 높이는 신뢰도에 한계가 있을 경우 필터링 기법을 사용하여 신뢰도를 높이는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 GPS 데이터의 신뢰도를 높이기 위한 필터링 기법으로 이동평균필터와 저역통과필터를 사용하였다.

먼저 이동평균필터는 측정데이터를 모두 사용하는 것이 아니라 지정된 개수의 최근 측정데이터만을 사용하여 평균값을 계산하는 필터이다. 새로운 데이터가 갱신되면 가장 오래된 데이터를 버려 데이터 개수를 일정하게 유지하면서 평균을 구한다. 다음은 n 개의 데이터에 대한 이동평균을 식으로 표현한 것이다.

$$\bar{X}_k = \frac{X_{k-n+1} + X_{k-n+2} + \dots + X_k}{n} \quad (10)$$

기존의 평균필터와 달리 $k-n+1$ 번째 데이터부터 k 번째 데이터까지 총 n 개 데이터의 평균을

의미한다. 위 수식을 재귀식으로 만들면 다음과 같다.

$$\bar{X}_k = \bar{X}_{k-1} + \frac{X_k - X_{k-n}}{n} \quad (11)$$

하지만 여기서 이동평균필터만을 이용하면 한 가지 문제가 발생한다. 바로 오래된 데이터와 최신 데이터를 같은 비중으로 취급하는데 있다. 하지만 저역통과필터를 사용하면 최근 측정치에 높은 가중치를 주고 오래된 데이터일수록 낮은 가중치를 부여하면 이동평균필터의 단점을 보완할 수 있다. 다음 식이 저역통과필터이다. 여기서 가중치 α 는 $0 < \alpha < 1$ 인 상수이다.

$$\bar{X}_k = \alpha \bar{X}_{k-1} + (1 - \alpha) X_k \quad (12)$$

3.3.1 GPS 경위도를 우리나라 경위도로 바꾸는 방법

GPS경위도와 우리나라 경위도는 사용하는 타원체의 제원이 다르므로 변환이 필요하다. 또, GPS경위도는 최근의 정밀 위성측지기술에 의하여 측정되고 표시 되는데 비하여, 과거부터 사용되던 경위도는 삼각망의 정확도에 따라 지역별로 다소의 오차가 포함되어 있으며, 측지측량에 따른 오차와 일본의 측지계로부터 옮겨오는 과정에서 포함된 오차등이 포함되어 있으므로 좌표변환시 좌표축의 이동, 회전, 축척변경(Translation, Rotation, Scaling)이 필요하다. 이과정을 나타내면 Fig. 20 과 같다.

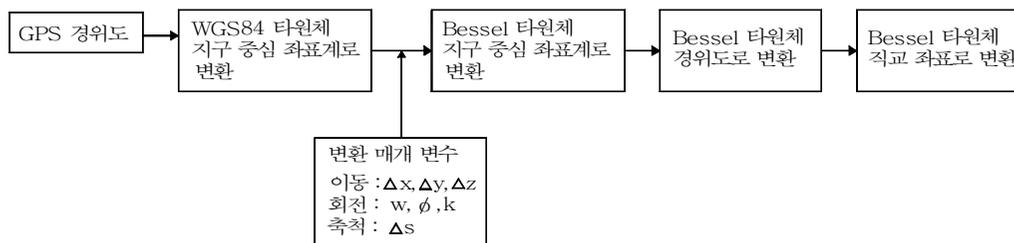


Fig. 20 Conversion of the GPS latitude and longitude

이 과정에 대한 역변환, 즉 Bessel 타원체 직교좌표 \rightarrow GPS 경위로의 변환은 그 반대의 과정을 거친다.

(1) 경위도를 지구 중심좌표계로의 변환 및 역변환

지리좌표계는 위도(ϕ), 경도(λ), 높이(h)로 구성되는 좌표계로서 타원체상에서의 위치표현에 편리하다. 임의의 점 Q의 위도(ϕ)는 점 Q를 통과하는 타원체의 법선과 적도면이 이루는 각으로 정의하며 적도면을 위도 0° 양 극 쪽으로 진행할수록 북위 90° 남위 90° 로 접근한다. 경도(λ)는 그리니치 천문대를 통과하는 자오선과 점 R을 통과하는 자오선 사이의 각으로 정의하며 그리니치 자오선으로부터 적도를 따라 동쪽으로 360° 까지 표현하거나 서쪽으로 360° 까지 표현한다. 그리고 높이 h 는 점 Q의 법선을 따라 측정된 타원체로부터 거리를 나타낸다.

지심직각좌표계는 원점을 타원체중심과 일치하도록 하였으며 타원체의 중심으로부터 그리니치 자오선과 적도면이 만나는 점으로 연장선을 그어서 X축으로 정의한다. 또한 X축으로부터 적도면을 따라 동쪽으로 90° 위치에 Y축을 정의한다. 타원체의 회전축을 Z축으로 한다.(권대원, 1995)

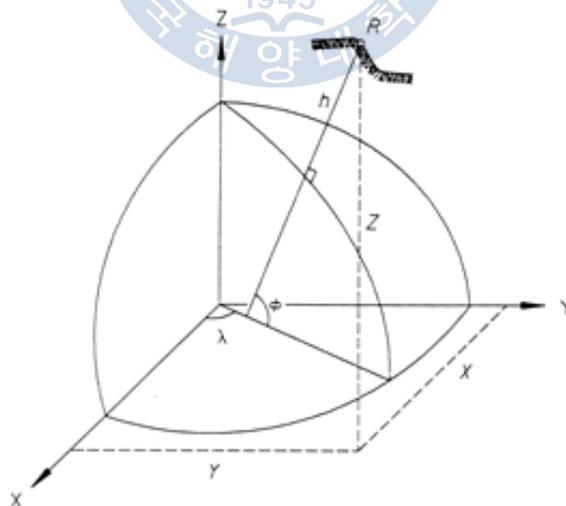


Fig. 21 Geographic coordinates ϕ , λ , h / Geocentric Cartesian X , Y , Z

점 Q의 지리좌표 $Q(\phi, \lambda, h)$ 가 주어질 경우에 대응되는 지심직각 좌표 $Q(X, Y, Z)$ 는 식 (13) 과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} X &= (N+h) \cdot \cos\phi \cos\lambda \\ Y &= (N+h) \cdot \cos\phi \sin\lambda \\ Z &= \left(\frac{b^2}{a^2}N+h\right) \cdot \sin\phi \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 a 는 타원체의 장반경, b 는 타원체의 단반경이며 N 은 횡곡률반경으로 다음과 같이 정의된다.

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2\cos^2\phi + b^2\sin^2\phi}} = \frac{a}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\phi)}} \quad (14)$$

한편, 점 Q의 지심직각좌표 $Q(X, Y, Z)$ 가 주어질 때 대응되는 지리좌표 $Q(\phi, \lambda, h)$ 는 다음과 같이 계산된다. (ϕ 는 반복계산)

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2}N+h\right)\sin\phi \text{ 에서}$$

$\frac{b^2}{a^2}N+h$ 는 대각선길이이고 밑변길이 L 은 다음과 같다.

$$L = \sqrt{\left(\frac{b^2}{a^2}N+h\right)^2 - Z^2} \quad (15)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{Z}{L}\right), \lambda = \arctan\frac{Y}{X}, h = \frac{p}{\cos\phi} - N \text{ 이므로}$$

여기서

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2} = (N+h) \cdot \cos\phi \quad (16)$$

이며, e 는 제1 이심율, e' 는 제2 이심율이므로 다음과 같이 정의된다.

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (17)$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (18)$$

이때 사용하는 타원체의 제원 예는 다음과 같다.

GPS사용 타원체 : WGS1984 장반경 $a = 6\,378\,137 \text{ m}$, 편평도 $f = 1 / 298.257\,223\,563$

우리나라 사용 타원체 : Bessel1841 장반경 $a = 6\,377\,397.155$, 편평도 $f = 1 / 299.152\,812\,8$

(2) 타원체간 지구중심좌표계 변환 방법

① Bursa wolf의 변환

Bursa와 Wolf에 의해 제시된 7-매개변수 변환모델은 식 (19) 와 같으며 일반

적인 형태는 Fig. 22 와 같이 표시된다.

$$\underline{X}_B = (1 + \Delta s)R_z(\kappa)R_y(\phi)R_x(\omega)\underline{X}_W + \underline{T} \quad (19)$$

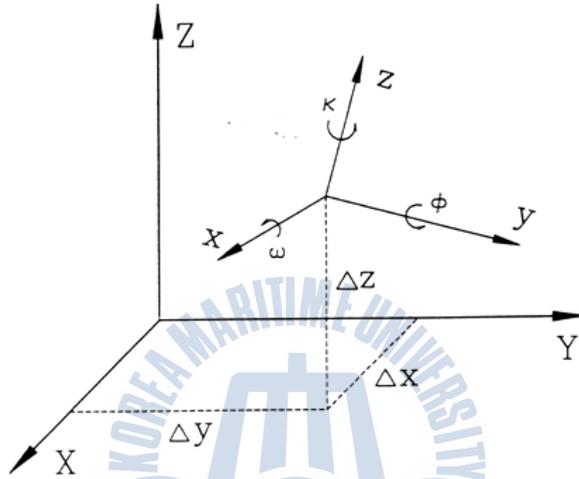


Fig. 22 Bursa-Wolf Transformation Model

식 (19) 에서 X_B 는 우리나라 실용성과의 지심직각좌표, X_W 는 WGS84상의 지심직각좌표이고, T 는 이동량벡터(Δx , Δy , Δz)이며, Δs 는 축척차이다. $R_z(\kappa)R_y(\phi)R_x(\omega)$ 는 두 좌표계사이의 회전을 나타내는 행렬로서 식 (20) 과 같다.

$$R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \cos\omega \sin\kappa & \sin\omega \sin\kappa \\ + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa & -\cos\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\kappa \\ \sin\omega \cos\kappa & -\sin\omega \sin\phi \sin\kappa & \sin\phi \\ + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa & \sin\phi & \\ -\sin\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi & \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 (20) 에서 w, ϕ, κ 는 각각 x, y, z 축에서의 회전각을 의미하며, 회전각이 미소하다고 가정하면 식 (20) 은 다음 식 (21) 과 같이 표시할 수 있다.

$$R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} 1 & \kappa & -\phi \\ -\kappa & 1 & \omega \\ \phi & -\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

식 (20) 과 식 (21) 의 회전각 차이가 1" 정도일 때에 0.5×10^{-11} 수준이며, 3" 정도일 때에는 0.5×10^{-10} 수준이며, 9" 정도일 때에는 0.5×10^{-9} 수준이다. 0.5×10^{-9} 의 오차는 좌표에 있어서 3mm 정도로 전파된다.

Bursa wolf 역변환을 하면 다음 식 (22) 로 정의되며

$$X_w = \frac{1}{1 + \Delta s} [R]^{-1} (X_B - T_X) \quad (22)$$

여기서 $[R]^{-1}$ 는 $[R]$ 의 역행렬이며 다음과 같다.

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 - \kappa & \phi \\ \kappa & 1 - \omega \\ \phi & \omega & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

② Molodensky - Badekas 의 변환

WGS84의 좌표계를 구좌표계(x, y, z)라 하고 Bessel 타원체에 근거한 우리나라의 좌표계를 신좌표계(X, Y, Z)라 하면 Molodensky-Badekas 변환모델은 식 (24) 와 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} + (1 + \Delta s) \begin{bmatrix} 0 & \kappa & -\phi \\ -\kappa & 0 & \omega \\ \phi & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (24)$$

Molodensky - Badekas의 역변환을 하면 다음 식 (25) 와 같고

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{1}{1 + \Delta s} [R]^{-1} (X - T_X \times \Delta s \chi) \\ &\doteq \frac{1}{1 + \Delta s} [R]^{-1} (X - T_X) (1 + \Delta s) \end{aligned} \quad (25)$$

변환 매개변수는 연구자에 따라 또 연구대상지역에 따라 다소 차이가 있다. 전반적으로 적게는 몇 10cm에서 많게는 수 m의 변환 차이가 발생하며, 특히 표고는 지오이드고가 불확실함에 따라 더욱 차이가 크므로, 변환 후 측량하는 가까운 기지점에서의 차이와 비교하여 또 한번 보정하는 것이 필요하다.(권대원, 1995)

(3) 타원체고와 표고의 환산

WGS경위도로부터 변환한 타원체고로부터 정표고를 구하려면 Fig. 23 에서와 같이 지오이드고를 알아야 한다.

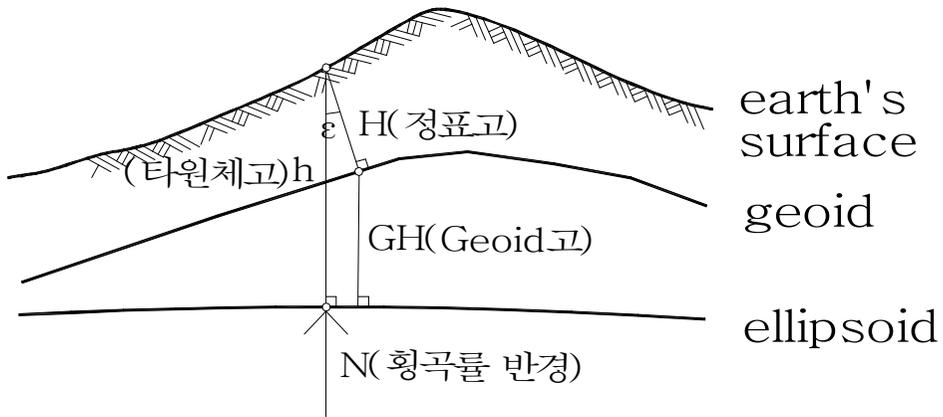


Fig. 23 Ellipsoid, Geoid, Orthometric height

우리나라 근처에서의 WGS 타원체면, Bessel타원체면 및 Geoid고의 관계는 Fig. 24 과 같다.

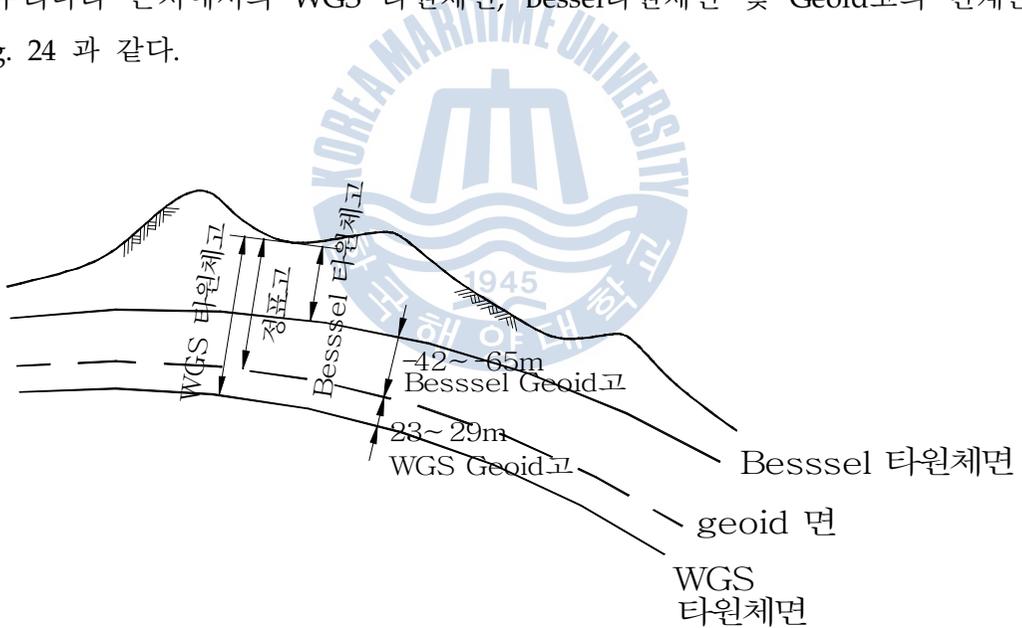


Fig. 24 Relationship between the ellipsoid and the geoid surface side

미국 Texas대의 Peter H. Dana는 Defense mapping agency에서 제공한 geoid data로부터 세계를 10도 간격으로 분할하여 각 점에 대한 WGS 타원체

의 geoid고에 대한 자료를 정리하였다. 자료에 의하면 우리나라 부근의 북위 30도 동경 120도에서 GH=7, 130도에서 GH=29, 북위 40도 동경 120도에서 GH=3, 130도에서 GH=23으로 되어있다.

(4) 우리나라 경위도와 직교좌표간의 환산 방법

우리나라는 경위도를 직교좌표로 환산하는데 횡 메카도르(Transverse Mercator) 투영법을 사용하며, 좌표원점 및 축척계수는 다음 Table 13 과 같다.

Table 13 Coordinate origin and Scale factor

서부원점	위도 $\phi = 38^\circ$	$x = 500\ 000$
	경도 $\lambda = 125^\circ$	$y = 200\ 000$
중부원점	경도 $\lambda = 127^\circ$	
동부원점	경도 $\lambda = 129^\circ$	
축척계수 m_0 (또는 S_0) = 1.0000 (어떤 국가에서는 0.9999, 0.9996등을 사용함)		

우리나라 측지계에 포함된 왜곡을 보정하기 위하여 경도에는 10.405초를 가산한다. 즉 서부원점의 경우 $\lambda = 125^\circ - 00' - 10.405''$ 가 $y = 200\ 000$ 이 된다. 삼각점 성과표에 따라서는 이 값을 가산해서 나타낸 경우도 있고 가산하지 않고 표시한 경우도 있다.

직교좌표와 경위도간의 좌표환산 방법에 대해 이해하고 계산하여 환산상수를 구하여 좌표환산에 사용하였다. 본문에서 직교좌표와 경위도간의 좌표환산에 대한 더 이상의 자세한 설명은 생략하며 필요시 국립지리원에서 제공하는 규정을 참고한다. 좌표환산이 완료되면 다음 식을 이용하여 두 지점 사이의 거리를 계산할 수 있다.()

$$D = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \tag{26}$$

3.3.2 3개의 GPS를 이용한 보정 알고리즘

저가형 GPS 3개를 이용하여 데이터를 보정하여 신뢰성 및 정확성을 높이는 알고리즘을 구현하였다. 알고리즘은 3개의 GPS를 이용하여 각 GPS 마다 신호를 수신하는 위성의 개수만큼 가중치를 적용하여 위성 개수가 많은 GPS의 데이터에 높은 신뢰도를 부여하여 좌표 값의 경향을 살폈다. 아래 식은 설명한 알고리즘을 간단하게 정리하여 수식으로 표현한 것이다.

$$x = \frac{Long1 \times Sat1 + Long2 \times Sat2 + Long3 \times Sat3}{Sat1 + Sat2 + Sat3} \quad (27)$$

$$y = \frac{Lati1 \times Sat1 + Lati2 \times Sat2 + Lati3 \times Sat3}{Sat1 + Sat2 + Sat3}$$

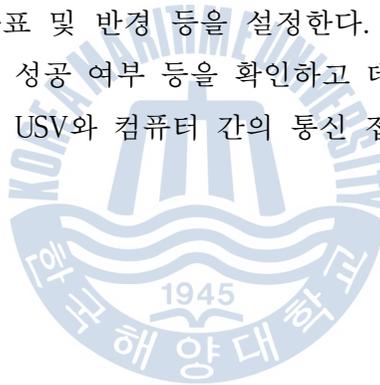
다음 Fig. 25 은 GPS 3개를 이용하여 시뮬레이션 한 것으로 3번 GPS의 위성 개수를 변화시킴에 따라 달라지는 가중치로 인해 변화하는 최종 좌표 값을 나타낸 것이다.



Fig. 25 Simulation of complex GPS systems

3.4 Control Interface의 연구

USV의 구동을 위해 개발한 Interface 프로그램은 아래 Fig. 26 과 같다. Microsoft Visual C# 프로그램을 이용하여 개발하였다. USV의 실험을 위해 다양한 편의성 기능을 추가하였으며 현재의 GPS 좌표를 확인할 수 있고 목표 좌표를 입력할 수 있다. 또한 이동하는 경로를 확인하며 목표지점까지의 거리를 확인할 수 있으며 계수 조정 등을 통해 항상 다른 해상환경에 맞추어 설정하는 것 또한 가능하다. 아래 Fig. 26을 보면 총 3개의 탭으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 탭의 1번 영역은 USV의 제어 모드를 설정하고 통신응답을 확인하는 부분이다. 2번 영역에서는 IMU 센서와 GPS의 좌표 데이터를 직접 확인할 수 있다. 3번은 USV의 목표 위치를 기준으로 현재 위치를 그래프로 나타내는 영역이다. 4, 5, 6번 영역에서는 해상 상황에 적합한 제어를 할 수 있도록 각종 계수, 목표 좌표 및 반경 등을 설정한다. 그리고 두 번째 탭에서는 패킷의 정상유무 및 통신 성공 여부 등을 확인하고 데이터를 저장할 수 있으며 세 번째 탭에서는 다수의 USV와 컴퓨터 간의 통신 접속 및 접속 종료 등의 기능을 수행할 수 있다.



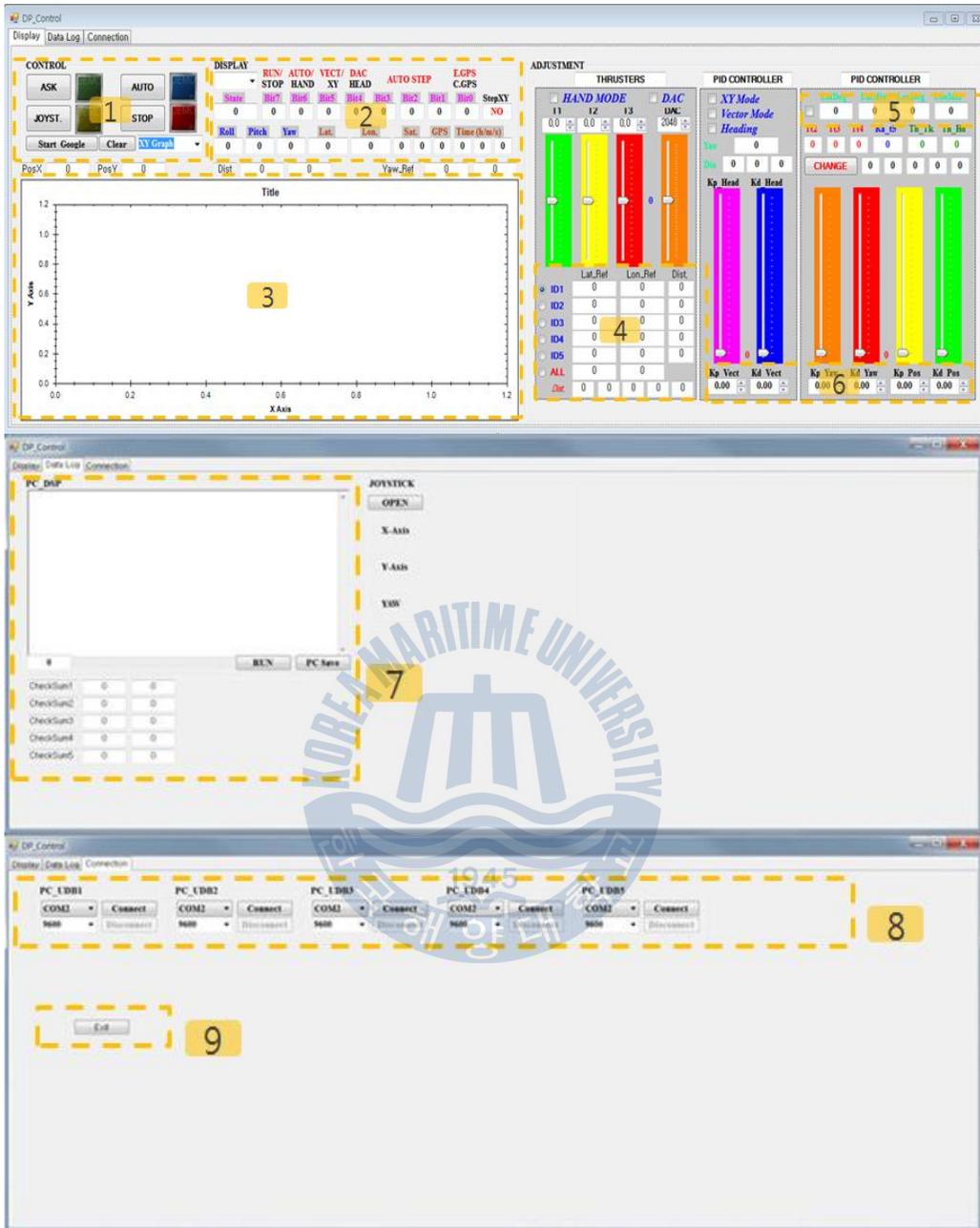


Fig. 26 Control Interface of USV

제 4 장 USV의 항법시스템 연구

임무를 전달 받은 USV는 아래 와 같이 GPS 와 IMU 로부터 USV의 위치 및 상태 정보를 입력 받아 Main Processor에서 USV 제어 알고리즘을 통하여 각 모터의 드라이버에 제어 명령을 전달하고 모터를 제어함으로써 USV는 구동된다.

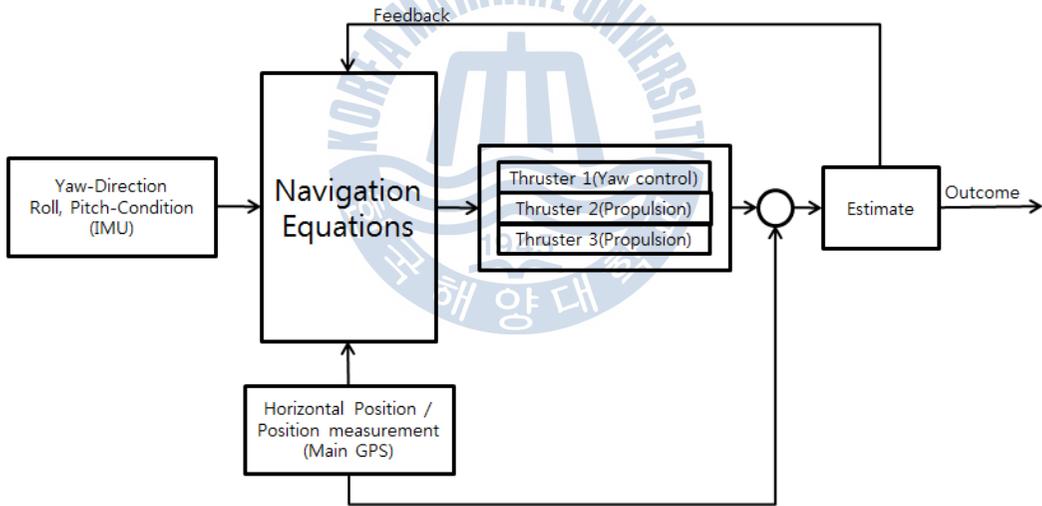


Fig. 27 USV Block diagram

4.1 경로 추적 제어(Waypoint Tracking Control)

USV에서 경로 추적 제어를 하기 위해서는 선수각을 제어하여야 하는데, 일반 선박의 타에 해당하는 횡방향 추진체가 제어대상이다. Fig. 28 은 위치 추적 제어 알고리즘의 개념을 보여준다. 여기서 (x_d, y_d) 는 다음 목표위치이며 (x, y) 는 USV의 현재 위치, Ψ 는 현재 선수각을 의미한다. 목표 선수각 Ψ_d 는 주시선(Line of sight, LOS)을 이용한 유도법칙을 통해 식(28) 과 같이, 목표위치와 현재위치를 이용하여 계산된다. 본 알고리즘을 통해 횡방향 추진체로의 명령 신호가 제어된다.

$$\Psi_d(t) = \tan^{-1}\left(\frac{y_d(k) - y(t)}{x_d(k) - x(t)}\right) \quad (28)$$

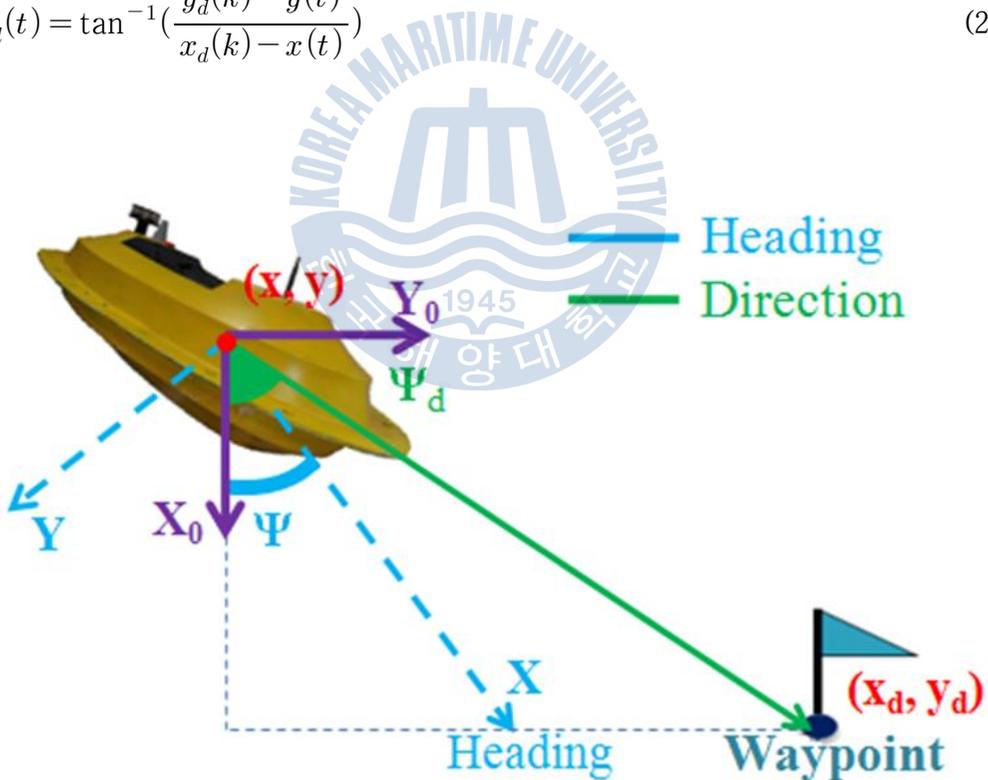


Fig. 28 Waypoint tracking with heading control of the USV

앞서 계산된 목표 선수각과 현재 선수각 사이의 오차를 이용하여 PD 제어기를 적용하여 위치 추적 제어 알고리즘을 설계하였다. 선수각 제어를 수행하여 미리 설정한 k번째의 목표 위치 반경 내에 도달하게 되면 아래 식(29)를 만족하여 k+1번째 목표위치를 향해 위치 추적 제어 알고리즘이 구동된다. 이런 식으로 최종 목표위치까지 차례로 위치 추적을 수행하게 된다.

$$[x_d(k) - x(t)]^2 + [y_d(k) - y(t)]^2 \leq \rho_0^2 \quad (29)$$

설계한 USV의 경로 추적 제어 알고리즘을 시뮬레이션하였다. 여기서 수평면에 정사각형 경로로 목표위치를 (0, 0), (0, -14), (14, -14), (14, 0)으로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 안정적으로 선수각을 제어하여 목표위치를 추적하였다. 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 29 와 같다.



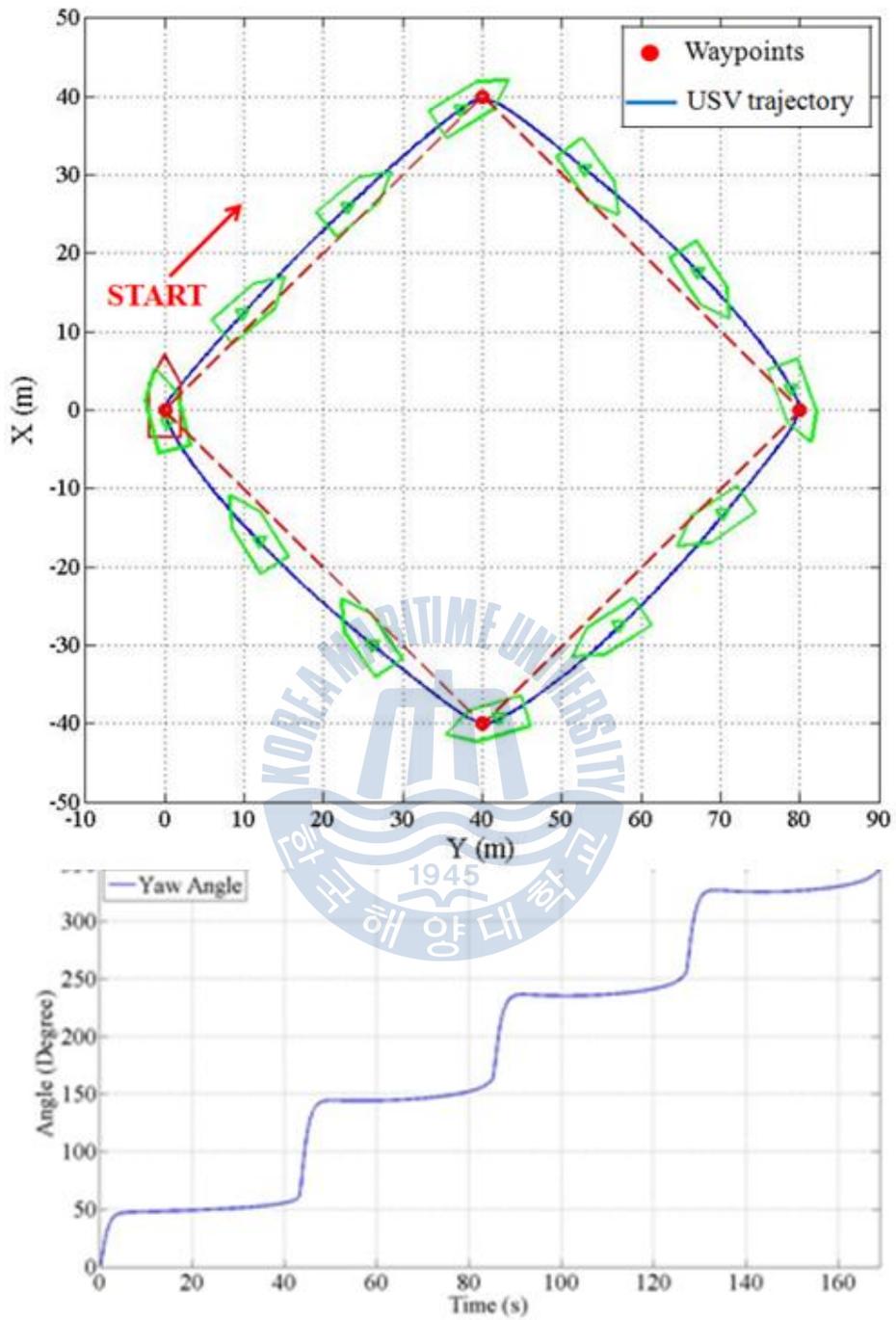


Fig. 29 Waypoint tracking simulation result

이후 알고리즘을 USV 플랫폼에 적용하여 실험역에서 성능시험을 수행하였다. 아래 Fig. 30 를 보면 시뮬레이션 결과와 비슷한 안정적인 데이터를 확인할 수 있다.

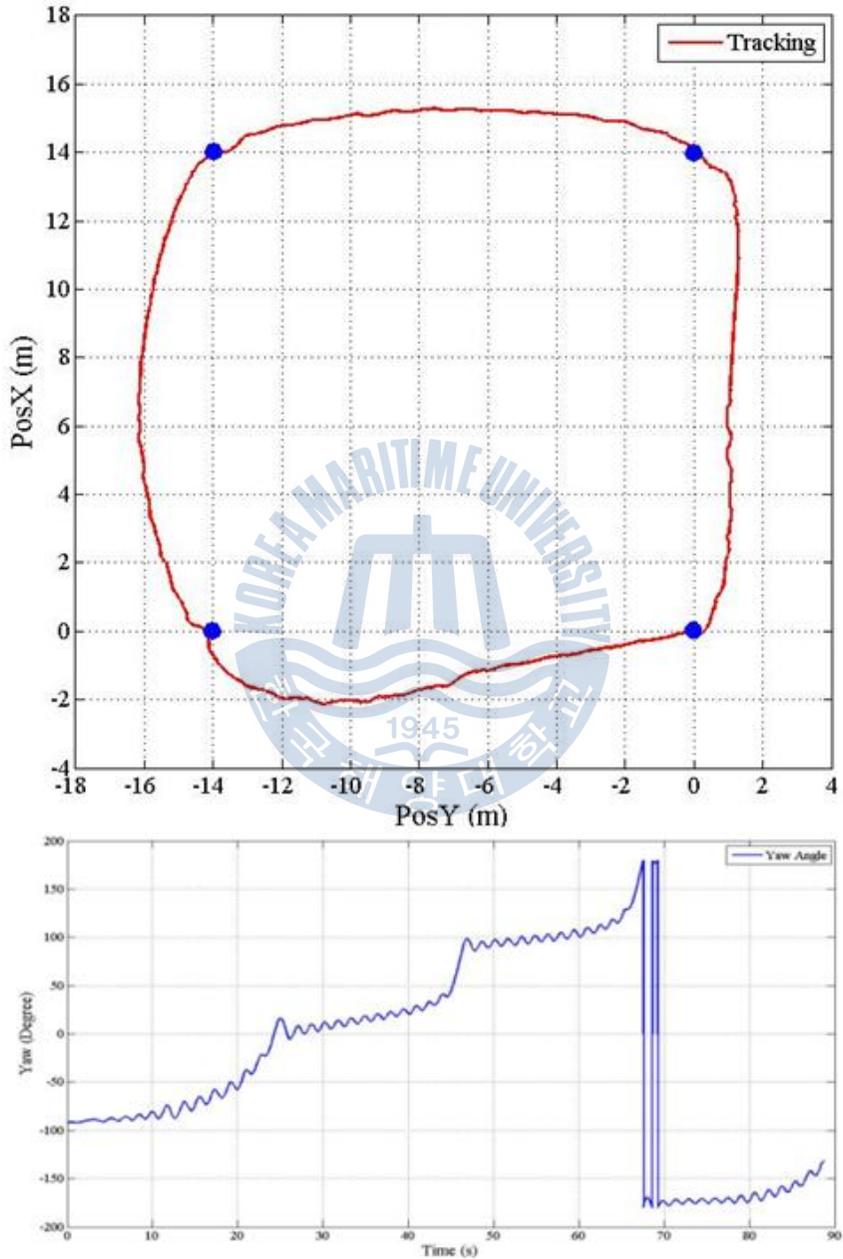


Fig. 30 Waypoint tracking experiment result



Fig. 31 Waypoint tracking control experiment



4.2 위치 고정 제어(Position fixing Control)

앞서 설계한 경로 추적 제어 알고리즘을 이용하여 위치 고정 제어 알고리즘을 설계하여 적용하였다. 하나의 고정된 목표위치를 중심으로 한 반경의 크기를 조절하여 위치 고정 제어를 하는 것이다. 즉, 하나의 목표 위치로 계속해서 경로 추적 제어를 한다고 볼 수 있다. 따라서 식 (28), 식 (29)를 동일하게 사용하여 알고리즘을 구성한다.

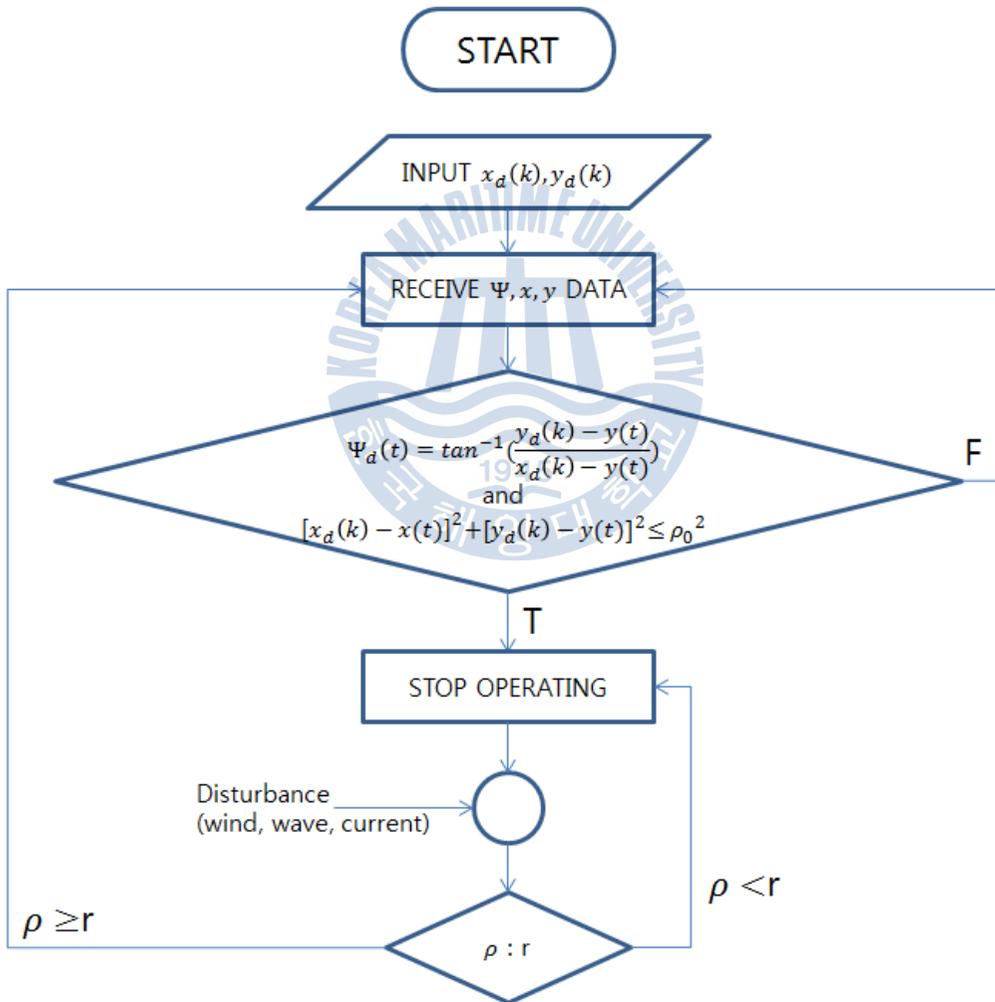


Fig. 32 Flowchart of Position fixing control

위치 고정 제어를 수행할 목표 좌표 $x_d(k), y_d(k)$ 를 입력하면 현재 선수각과 좌표 값을 확인하여 식 (28), (29)를 수행한다. 이를 만족하게 되면 USV가 목표 위치에 도달한 것이므로 동작을 멈춘다. 이 때 바람, 파도, 조류 등의 외란으로 인해 USV와 목표 위치와의 거리 ρ 가 목표 반경 r 보다 크거나 같으면 다시 제어를 수행하게 된다. 이처럼 명령이 지속되는 한 위 Fig. 32 의 순서도의 알고리즘을 반복 수행한다. 아래 Fig. 33은 실제 모션을 알기 쉽게 모식도로 설명한 것이다.

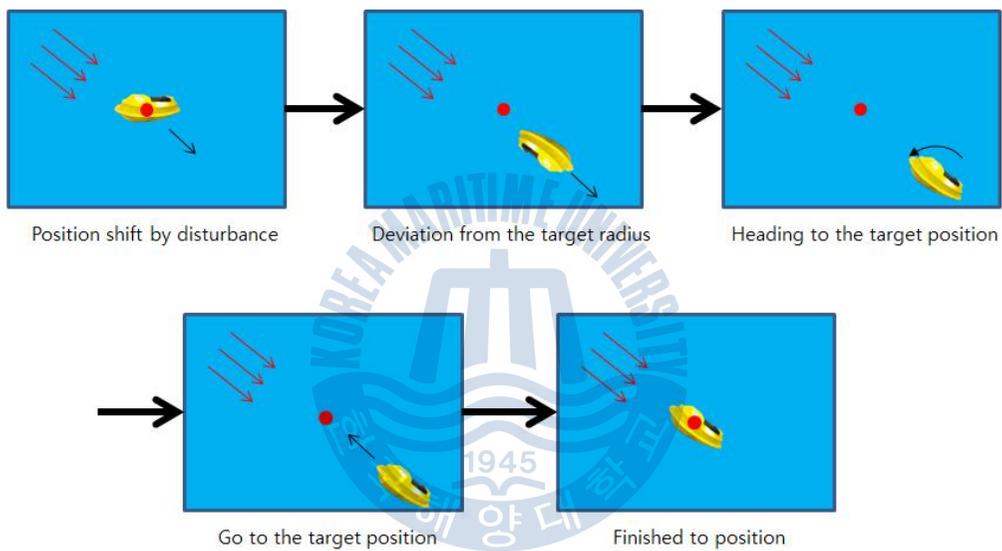


Fig. 32 Position fixing control of the USV

설계한 동적 위치 제어 알고리즘을 USV에 적용하여 실험해역에서 성능시험을 수행하였다. 기상 및 해상상태는 2014년 10월 4일 17시경 부산지방기상청 기준 일일평균 4.5m/s 이고 부산북향 파고부이 기준 유의 파고 2m, 최대 파고 2.7m, 평균 파고 1.3m 이다. 목표위치의 반경은 4.5m 로 설정하여 약 3시간 동안 1초 간격으로 데이터를 저장하여 Fig. 34 에 나타내었다.

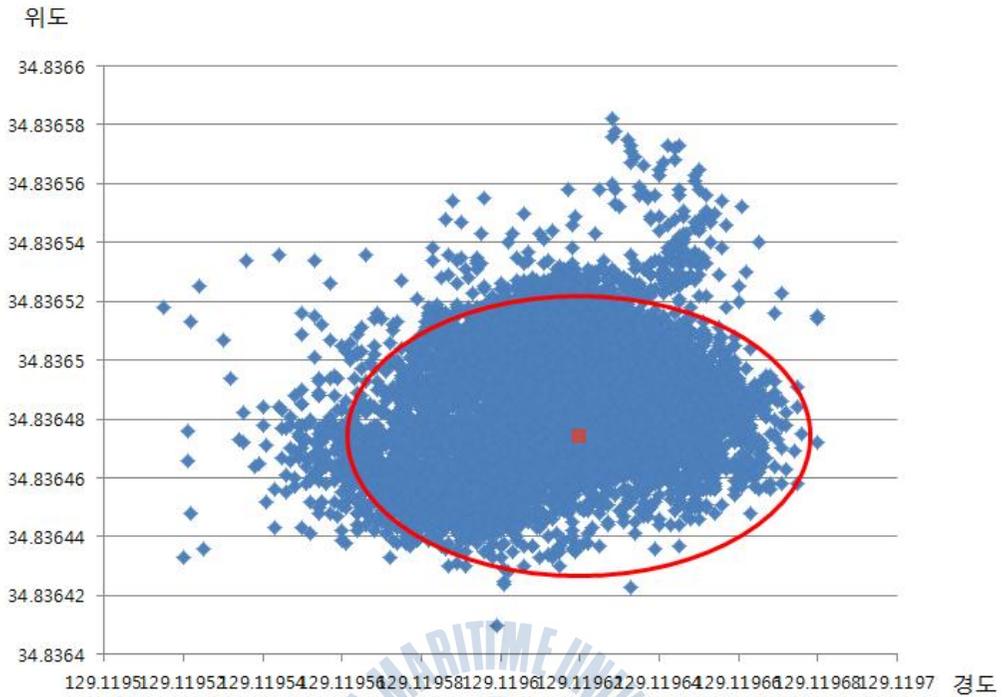


Fig. 34 Position fixing control experiment result

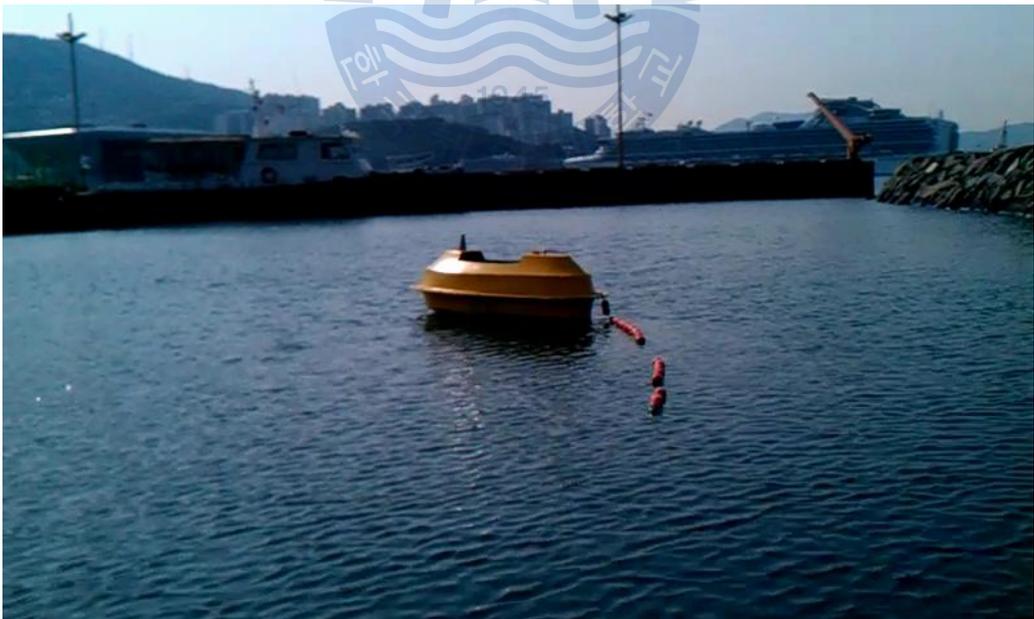


Fig. 35 Position fixing control experiment

제 5 장 USV의 중계 장치 연구 및 성능 시험

본 연구에서는 USV만의 임무만이 아닌 수중로봇의 중계기로서 임무도 보유한 USV를 연구하였다. 아래 Fig. 36 는 다중 통신시스템과 USBL을 이용한 중계 임무를 수행하는 USV의 모습을 나타낸 모식도이다.



Fig. 36 The concept of USV performing a repeater

5.1 다중 통신시스템 시험

다수의 USV를 동시에 운용하면 보다 넓은 영역에서의 동시다발적인 임무수행이 가능하다. 본 절에서는 수면에서 독자적인 임무를 수행하는 USV, 수중에서 임무를 수행하는 UUV를 보조하는 중계 USV 등의 상황을 가정하여 다중 통신시스템을 시험하였다.

교내에 위치한 운동장을 해상환경으로 가정하였으며 총 4대의 제어시스템을 구성하여 약 30m의 간격으로 사각 배치하여 Control Interface를 통해 데이터를 수신하는 시험을 수행하였다.



Fig. 37 The position of control system for Multi communication test

아래 Fig. 38에서 볼 수 있듯이 평면좌표 상에서 4대의 시스템의 위치를 모두 확인할 수 있으며 GPS 좌표와 IMU 정보 또한 확인 가능하다. 앞서 수행했던

시험에 의해 경로 추적 및 위치 고정 제어 성능을 확인하였기에 추가 USV 플랫폼을 갖추게 된다면 제어시스템을 그대로 장착하여 해상에서도 다중 통신시스템의 시험이 가능하다.

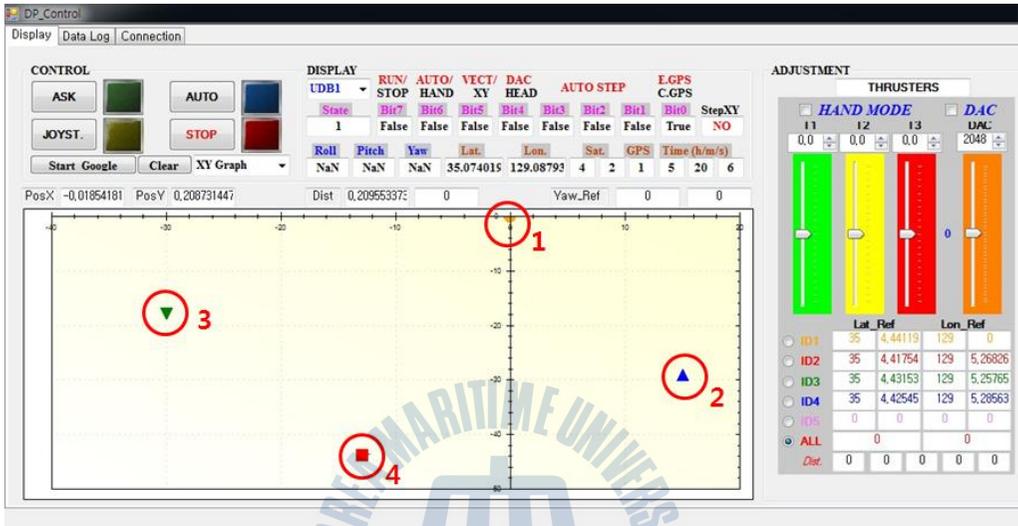


Fig. 38 The result of Multi communication test in the control interface

5.2 수중로봇 중계 임무를 위한 USBL 시험

수중 운동체의 위치추적 방식은 추적용 센서 간 간격에 따라 장거리 기선(Long Baseline, LBL), 단거리 기선(Short Baseline, SBL), 초단거리 기선(Ultra Short Baseline, USBL) 방식으로 구분한다.

LBL(Long Baseline) 수중위치추정 기법은 수백 미터로부터 넓게는 수십 킬로미터까지 대체로 넓은 영역에서 사용되는 추적체계이다. 여러 개의 트랜스폰더의 간격을 넓게 하여 수중에 부설해야 하므로 트랜스폰더의 설치 및 회수에 시간과 인력이 과다 소요되나 LBL은 SBL이나 USBL에 비해 기선(baseline)이 더 길기 때문에 SBL이나 USBL 보다 더 정확성을 기할 수 있는 장점이 있다.

SBL(Short Baseline) 수중위치추정 기법은 수십 미터 간격으로 추적용 음향센서를 선체의 선저에 부착하여 근거리 표적의 위치를 추적한다. 제한된 여건에서 비교적 정확도가 높지만 3개 이상의 음향센서가 부착 가능한 환경이 마련되어야 운영이 가능하다.

USBL(Ultra Short Baseline) 수중위치추정 기법은 한 그룹의 음향센서 배열, 즉 하나의 트랜시버를 선체의 선저에 부착하여 수중 표적의 위치를 추적한다. 단일 센서 배열이므로 센서간격이 좁아 정확도 측면에서는 불리해질 수 있으나 설치가 용이하여 범용성이 높다. USBL에 의한 거리추정 개념은 표적에서 송신한 신호와 추적용 센서가 수신한 신호의 전달 시간을 상호상관관계(cross-correlation) 검출방식으로 계산하고 수중음속을 곱하여 거리를 계산한다. USBL에 의한 방위추정 개념은 표적으로 부터의 음향이 각 센서에 수신되면서 센서간 간격에 의해 발생하는 시간 지연(time delay) 또는 두 센서간의 위상지연(phase delay)에 의해 방위를 추정한다.(이근창 등, 2005)

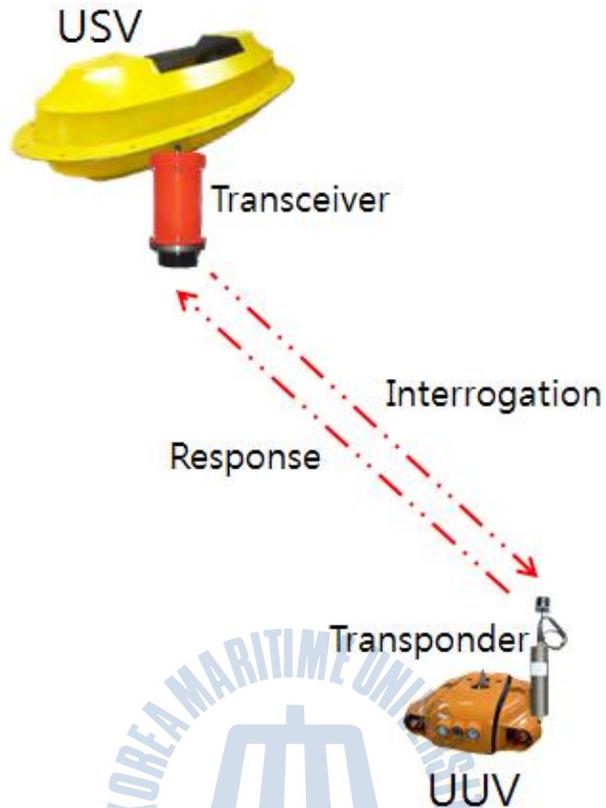


Fig. 39 USBL system

최근에 심해저에서 예인되는 전자장비는 USBL을 이용한 수중 위치추적 시스템을 운영하는 추세이다. 본 절에서는 LinkQuest Inc.의 TrackLink 1500 USBL Tracking System을 이용한 시험을 통하여 수중 로봇과 중계 USV간 임무 수행으로의 적용가능성을 입증하였다. 시험에 사용한 USBL의 제원은 Table 13 과 같다.

Table 14 Specifications of the TrackLink 1500 system(USBL)

Position Accuracy	3.0 degrees (TrackLink 1500LC)
Slant Range Accuracy	0.20 m
Targets Tracked	16
Operating Beamwidth	120 to 150 degrees
Working range with ship noise	up to 1500 m with TN1515 transponders
Maximum transceiver depth	up to 20 m
Input voltage	12 to 24 V
Power consumption(transmit)	10 W
Power consumption(receive)	1.6 W
Dimension	24 cm (length) x 12.6 cm (diameter)
Weight	3.5 kg

중계 임무 상황을 가정한 성능시험을 4.6m(너비) × 3m(폭) × 3m(높이) 크기의 수조에서 진행하였다. 수심은 2.7m로 유지하였으며 선체의 움직임을 고정하여 정밀한 위치 고정 제어를 하는 상황을 가정하였다. USBL Tracking system에서 추적의 대상이 되는 수중 로봇에 장착될 Transponder는 수조 바닥에 설치되었고 중계 USV에 장착되어 수중 로봇으로부터 송신되는 추적 신호를 수신할 Transceiver는 Bow 방향과 선수방향이 동일한 X축 선상에 위치하도록 장착하였다.

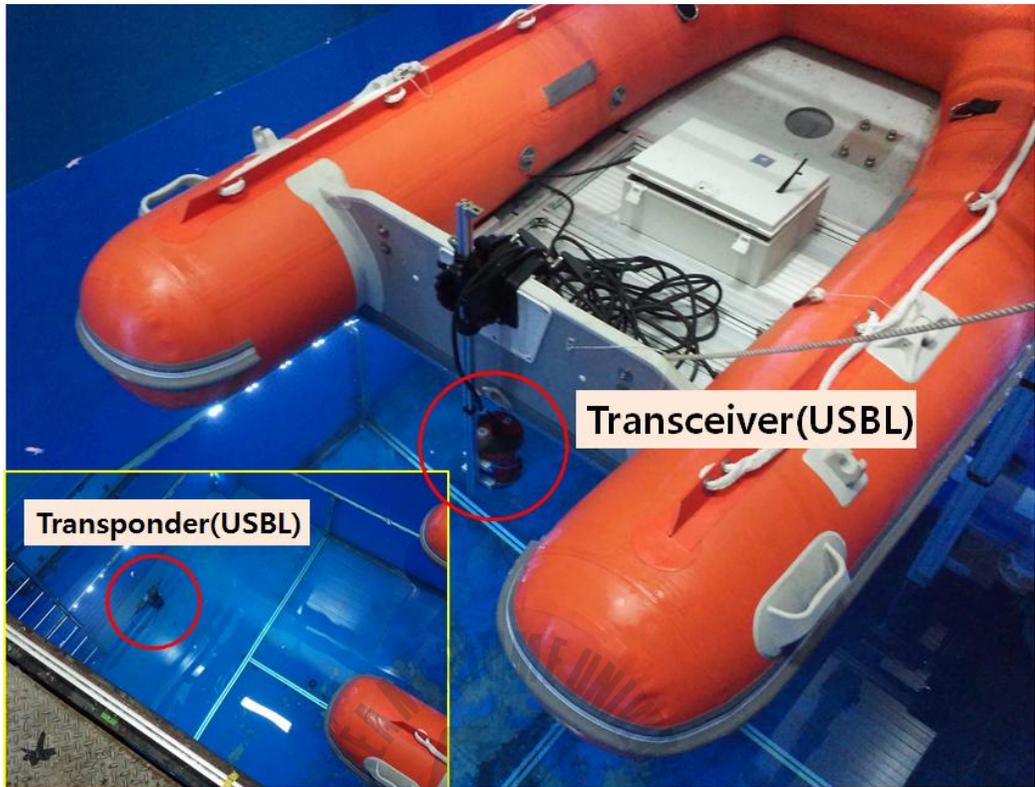


Fig. 40 USBL performance test

X축선상의 거리를 변수로 하여 Transponder와 Transceiver 간의 거리를 각각 2.5m, 1m 로 유지하여 시험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다. 좌측의 평면좌표를 보면 원점이 Transceiver의 위치이고 녹색 점으로 나타나는 부분이 Transponder의 위치이며 우측에는 Transceiver가 장착된 선체의 위치 정보와 이를 기준으로 한 Transponder의 정보가 나타나고 우측 하단에는 Transponder의 depth 정보를 실시간으로 확인할 수 있다. Fig. 41 을 보면 선체의 후방으로 약 2.5m 지점에 Transponder의 위치가 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 42 은 Transponder가 1m 지점에 위치해 있는 모습이다. 결과에서 알 수 있듯이 SBL, LBL에 비해서는 정확도가 낮은 USBL 이지만 수중 로봇의 중계 임무수행에 있어서는 만족할만한 정확도를 보였다.

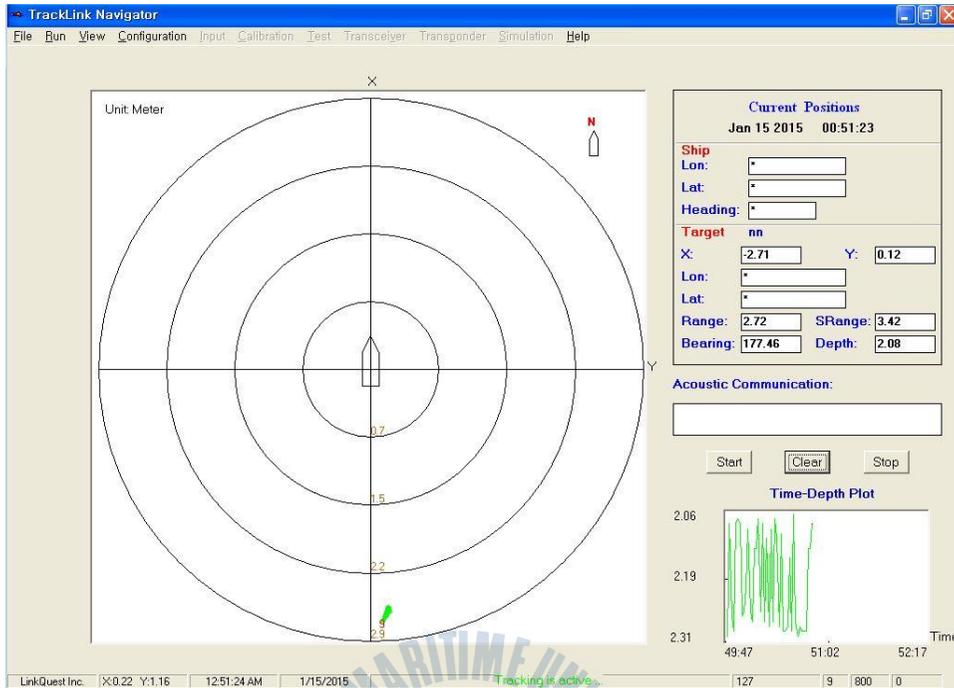


Fig. 41 The result of USBL performance test(1)

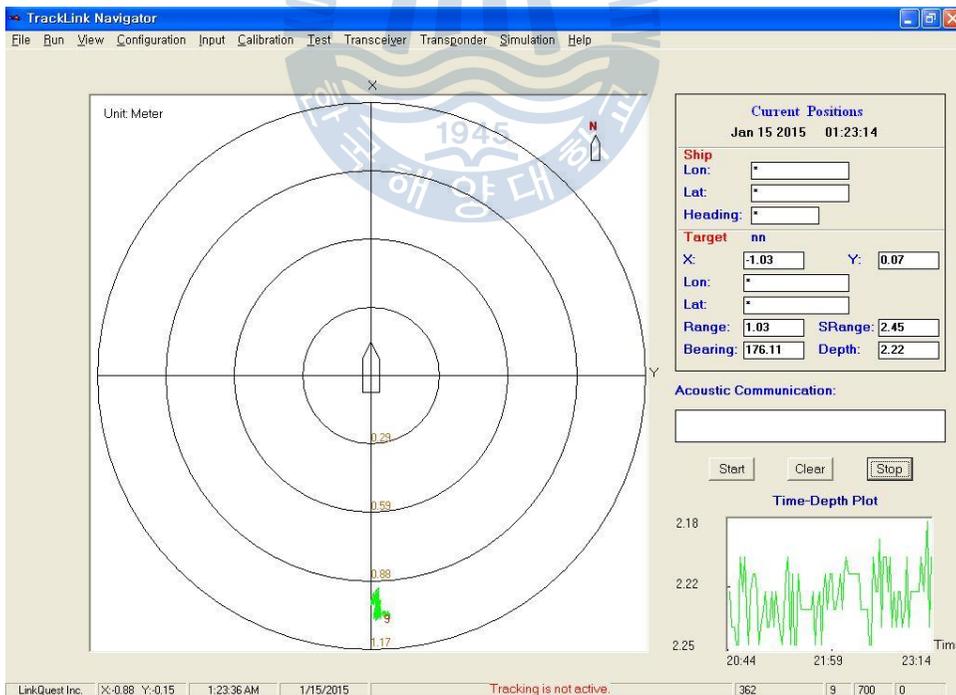


Fig. 42 The result of USBL performance test(2)

제 6 장 결론

본 연구에서는 기존의 보편적인 USV에서 동적 위치 제어와 중계기로서의 다양한 임무 수행이 가능한 새로운 개념의 USV의 연구를 수행하였다. Surge 및 Sway 방향으로 설치한 3개의 추진체와 GPS 와 IMU 센서를 이용한 제어 및 항법시스템을 설계, 제작하였다. 이를 바탕으로 선수각 제어를 통한 위치 추적 알고리즘, 동적 위치 제어 알고리즘을 설계하고 성능을 입증하였다. 또한 무인잠수정과 연계 임무 수행을 위하여 중계기 개념을 적용하여 무인잠수정 운용시 필요한 다양한 기능의 성능시험을 수행하였다.

1) 실험해역에서 USV의 위치 추적 제어(Waypoint tracking control), 위치 고정 제어(Position fixing control) 시험을 수행하였으며 데이터 수집 및 분석을 통해 신뢰도 높은 성능을 검증하였다.

2) 항법시스템을 위한 센서 및 제어시스템 구성과 알고리즘 및 프로그램을 USV에 적용하여 육상, 실험해역에서의 USV가 경로 추적 및 위치 고정 제어됨을 확인하였다.

3) 실험해역에서의 동적 위치 제어 결과, 비교적 좋지 않은 기상상황에서도 좋은 동작을 보였으며 데이터 분석 결과 목표위치와의 거리를 평균 3m 로 유지하였다(목표반경 4.5 m).

4) 4대의 제어시스템으로 이루어진 다중 통신시스템을 이용한 시험을 통해

다수의 무인수상선을 이용하여 광범위한 환경에서의 임무 수행이 가능함을 확인하였다.

5) 수중 로봇과의 연계 임무 상황을 가정하여 USBL을 이용한 시험을 수행, Transceiver와 Transponder 간의 위치추정 성능을 확인하여 연계 임무 능력의 가능성을 확인하였다.

이 같은 결과를 바탕으로 USV의 플랫폼과 알고리즘의 개선을 통해 새로운 기능과 중계 임무 성능을 추가하여 시험을 수행해야할 것이다.



참고문헌

- 홍신표 등, 2009. 무인선의 무선통신환경에 관한 연구. 한국해양공학회지, 23(2), pp.53-57.
- Office of the Secretary of Defense, 2007. Unmanned Systems Roadmap 2007~2032, Department of Defense of the United States.
- Pascoal, A. et al., 2000. Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV Project, IEEE OCEANS 2000, pp.409-415.
- Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., & Bruzzone, G., 2008. Unmanned Marine Vehicles at CNR-ISSIA, Proceedings of the 17th World Congress on The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp.3070-3075.
- Larson, J., Bruch, M. & Ebken, J., 2006. AUTONOMOUS NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE FOR UNMANNED SURFACE VEHICLES, SPIE Unmanned Systems Technology VIII, Orlando, FL, April 17-20, 2006
- Dunbabin, M., Lan, B. & Wood, B., 2008. Vision-based docking using an autonomous surface vehicle, in Proc. International Conference on Robotic and Automation, pp.26-32.
- Skjetne, R., Smogeli, Ø. & Fossen, T. I., 2004. Identification, and Adaptive Maneuvering of CyberShip II: A complete design with experiments, in Proc. of the IFAC CAMS'04, Ancona, Italy.
- Fossen, T. I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Wiley:London, U.K.
- A Matlab Tool for Parametric Identification of Radiation-Force Models of Ships and Offshore Structures. Modelling, Identification and Control, 2003. Marine System Simulator [Online] Available at: <http://www.marinecontrol.org> [Accessed 12 November 2014]

이창호 & 이수룡, 2009. 조선해양공학개론. 세리운.

최영수, 정경민, 이성욱 & 정승호, 2006. 원전 감시 점검을 위한 수중로봇 기술, 한국수중로봇기술연구회 2006년 추계 학술대회, pp.23-27.

Myring, D. F., 1976. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow, *Aeronautical Quarterly*, 27, pp.186-194.

박은성, 김기용, 성동수 & 이진배, 2014. GPS 정확도 향상을 이용한 CCTV 보안 서비스의 구현, *한국정보기술학회/한국정보기술학회지*, 12(3), pp.187-202.

권대원, 1995. 우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환. 석사학위논문. 서울:성균관대학교

이근창 등, 2005. 심해 예인 탐사장비의 위치 보정에 대한 고찰. September 2005 *Ocean and Polar Research*, 27(3), pp.335-339

