



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.

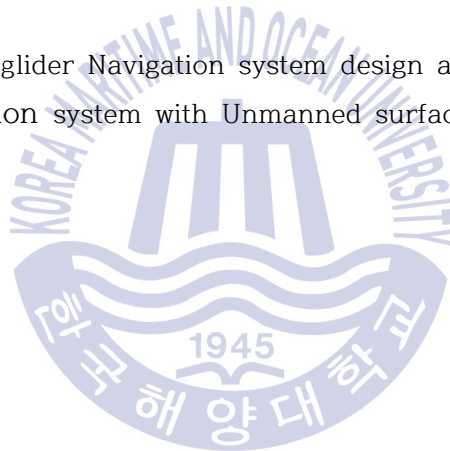
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

하이브리드 수중글라이더 항법 시스템 설계 및 무인 수상선과의 협력제어 시스템 연구

Hybrid underwater glider Navigation system design and leader-Follower
Navigation system with Unmanned surface vehicle



한국해양대학교 대학원

기계공학과

정상기

本 論文을 丁相基의 工學博士 學位論文으로 認准 함.



2017년 8월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract	xi

제1장 서 론

1.1 연구배경	1
1.1.1 무인 해양운동체	4
하이브리드 수중글라이더(Hybrid Underwater Gilder)	5
무인 수상선(Unmanned Surface Vehicle)	6
1.2 연구 목표	8
1.3 논문구성	9

제2장 하이브리드 수중글라이더 동력학 모델

2.1 하이브리드 수중글라이더 기구학(Kinematics)	11
2.2 하이브리드 수중글라이더 동력학(Dynamics)	13
2.2.1 부력엔진 역학해석	15
2.2.2 질량 이동 장치 역학 해석	15
2.2.3 유체력	17
2.2.4 유체력을 포함한 하이브리드 수중글라이더 6자유도 운동방정식	22

2.3 하이브리드 수중글라이더의 제어기 설계	24
2.3.1 신경망 PID 제어기를 적용한 하이브리드 수중글라이더 자세제어 알고리즘	24
2.3.2 하이브리드 수중글라이더 제어시스템 설계	28
2.4 하이브리드 수중글라이더의 시뮬레이션	29
2.4.1 기초운동 성능 및 제어성능 시뮬레이션	30
2.4.2 시뮬레이션 결과	34
 제3장 무인 수상선의 동력학 모델	
3.1 무인 수상선의 구조	41
3.2 무인 수상선의 동력학	42
3.2.1 무인 수상선의 동력학	42
3.2.2 유체력	43
3.2.3 유체력을 포함한 무인 수상선의 3자유도 운동 방정식 ·	46
3.3 무인수상선 운동성능 시뮬레이션	47
3.3.1 무인수상선의 기초운동 및 제어 성능 시뮬레이션	47
3.3.2 시뮬레이션 결과	48

제4장 하이브리드 수중글라이더와 무인 수상선의 시스템 구성

4.1 하이브리드 수중글라이더 제어 시스템 구성	55
4.1.1 제어시스템 구성	55
4.1.2 센서 시스템 구성	64
ARS 실험 및 결과	69
플랫폼 연동 테스트	76
4.2 하이브리드 수중글라이더의 항법 시스템	79
4.2.1 하이브리드 수중글라이더의 항법 시스템 설계	79
4.2.2 하이브리드 수중글라이더의 항법 시스템 시뮬레이션	81
4.3 무인 수상선 제어 시스템 구성	85
4.3.1 제어시스템 구성	85
4.3.2 센서 시스템 구성	89
4.4 무인 수상선의 항법시스템	90
4.4.1 무인 수상선 항법시스템 설계	90
4.4.2 무인 수상선 항법시스템 시뮬레이션	92
4.4.3 무인 수상선 항법시스템 테스트	95

제5장 하이브리드 수중글라이더(follower)와 무인 수상선(leader)의 협력항법

5.1 협력항법 (leader-follower 항법) 알고리즘	98
5.2 협력항법 시뮬레이션	99
5.2.1 신경망-PID 병렬제어기를 적용한 하이브리드 수중글라이더(follower)의 Heading Angle제어	103
5.2.2 신경망-PID 병렬제어기를 적용한 하이브리드 수중글라이더(follower)의 위치제어	105
5.1.3 협력 항법의 제어 시뮬레이션 결과	107

제6장 결론	114
참고문헌	116



List of Tables

Table 1	Specification of commercial underwater glider	4
Table 2	Specifications of USV	7
Table 3	3 D.O.F motion of the underwater vehicle	12
Table 4	Hydrodynamic Coefficients	24
Table 5	Parameters of propellers	47
Table 6	Simulation condition	50
Table 7	Simulation condition	52
Table 8	Dimensions of hybrid underwater glider	56
Table 9	Hybrid underwater glider simulation conditions	84
Table 10	Unmanned Surface Vehicle simulation conditions	95
Table 11	Unmanned Surface Vehicle specification	97

List of Figures

Fig 1.1 Ocean observation satellite	2
Fig 1.2 ARGO Float	2
Fig 1.3 ARGO Float Distribution and Collection Materials	3
Fig 1.4 (Left) Slocum Glider, (Right) Movement trajectory of Slocum	4
Fig 1.5 Commercial underwater glider	5
Fig 1.6 Underwater glider operation concept	6
Fig 1.7 Overseas Development of USV	7
Fig 2.1 Hybrid Underwater Glider Coordinate System	10
Fig 2.2 Coordinate system and position vector for modeling of Rigid body	13
Fig 2.3 Configuration of center of mass and buoyancy center of hybrid underwater glider	15
Fig 2.4 Length information of attitude control device	16
Fig 2.5 Neural network PID control algorithm	24
Fig 2.6 Hybrid underwater glider control system design	28
Fig 2.7 Simulator of Hybrid Underwater Glider	29
Fig 2.8 Position of internal moving mass	31
Fig 2.9 Position of buoyancy control piston	31
Fig 2.10 Vertical motion locus of hybrid underwater glider	32
Fig 2.11 Hybrid underwater glider rotation angle	32

Fig 2.12 Neural network self-tuning PID and simple PID gain	34
Fig 2.13 Neural network self-tuning PID and simple PID incident angle	35
Fig 2.14 The movable mass position of the neural network self-tuning PID and the movable mass position of the simple PID	35
Fig 2.15 Underwater location of hybrid underwater glider	36
Fig 2.16 Change of position of X, Z of hybrid underwater glider ..	36
Fig 2.17 Hybrid underwater glider attitude	36
Fig 2.18 Hybrid underwater glider speed	37
Fig 2.19 Circular motion locus of hybrid underwater glider	38
Fig 2.20 Circular Motion Trajectory in Three Dimensions of a Hybrid Underwater Glider	39
Fig 2.21 Hybrid underwater glider attitude	40
Fig 2.22 Hybrid underwater glider movement using propellant	40
Fig 3.1 6 degree of freedom of ship	41
Fig 3.2 Simulator of Unmanned Surface Vehicle	48
Fig 3.3 Unmanned Surface Vehicle linear start result	49
Fig 3.4 Cruising speed of Unmanned Surface Vehicle	50
Fig 3.5 Unmanned Surface Vehicle motion trajectory in straight running	50
Fig 3.6 Trajectory in the horizontal plane of the Unmanned Surface Vehicle during circular driving	51
Fig 3.7 Speed of Unmanned Surface Vehicle in circular driving ...	52
Fig 3.8 Movement trajectory of Unmanned Surface Vehicle during circular driving	52

Fig 4.1 The appearance of hybrid underwater glider	54
Fig 4.2 Hybrid underwater glider main drive control structure	56
Fig 4.3 Power System Architecture	57
Fig 4.4 Cross section of a hybrid underwater glider	58
Fig 4.5 Buoyancy engine	59
Fig 4.6 Attitude Controller	60
Fig 4.7 Thruster and Rudder	61
Fig 4.8 Basic drive test	62
Fig 4.9 Steering performance test	62
Fig 4.10 Maneuvering results using rudder	63
Fig 4.11 Structure of ARS algorithm	65
Fig 4.12 Kalman filter calculation procedure	67
Fig 4.13 ARS(Attitude reference system) design diagram	69
Fig 4.14 ARS test H/W(left) & rotating table(right)	70
Fig 4.15 Composition of turn table control system	70
Fig 4.16 Stop Test Results(a) Exercise(b) Test Results	71
Fig 4.17 Non algorithm Heading Data	72
Fig 4.18 ARS algorithm unused attitude data (Roll, Pitch, Yaw)	73
Fig 4.19 ARS algorithm used attitude data (Roll, Pitch, Yaw)	73
Fig 4.20 Raw Gyro Yaw Angle	74
Fig 4.21 Correction Geomagnetic Data	75
Fig 4.22 Calibrated ARS Yaw Angle	76
Fig 4.23 ARS Test Equipment	77
Fig 4.24 Outdoor driving test	77

Fig 4.25 Result of outdoor driving test	78
Fig 4.26 Running of a hybrid underwater glider	79
Fig 4.27 Hybrid underwater glider navigation system diagram	80
Fig 4.28 Hybrid underwater glider's final navigation system	81
Fig 4.29 Acquisition of real-sector USBL data	82
Fig 4.30 Hybrid underwater glider path following simulation	84
Fig 4.31 Unmanned Surface Vehicle	85
Fig 4.32 System structure of Unmanned Surface Vehicle	86
Fig 4.33 Control H/W of Unmanned Surface Vehicle	86
Fig 4.34 Upper & Lower Propeller Mechanics of Unmanned Surface Vehicle	87
Fig 4.35 Mechanism for mounting motor drive for Unmanned Surface Vehicle	88
Fig 4.36 Unmanned Surface Vehicle control system installed	88
Fig 4.37 Sensor system of Unmanned Surface Vehicle	89
Fig 4.38 USBL mounted on Unmanned Surface Vehicle	90
Fig 4.40 Running of Unmanned Surface Vehicle	91
Fig 4.41 Navigation system diagram of Unmanned Surface Vehicle	91
Fig 4.42 Unmanned Surface Vehicle path following simulation	94
Fig 4.43 Sea area navigation test of Unmanned Surface Vehicle ...	95
Fig 4.44 Sea area navigation test result	96
Fig 4.45 Sea area navigation test result graph	97

Fig 5.1 Hybrid underwater glider and Unmanned Surface Vehicle	
leader-follower navigation control	100
Fig 5.2 leader-follower navigation control of location sharing	101
Fig 5.3 Neural network-PID parallel controller	102
Fig 5.4 leader-follower navigation system diagram of hybrid	
underwater glider and Unmanned Surface Vehicle	106
Fig 5.5 Simulator of Hybrid underwater glider & Unmanned Surface	
Vehicle leader-follower navigation	107
Fig 5.6 Heading angle error between two moving bodies due to	
leader-follower navigation	108
Fig 5.7 Position error between two moving bodies due to	
leader-follower navigation	109
Fig 5.8 leader-follower navigation results of hybrid underwater glider	
and Unmanned Surface Vehicle	110
Fig 5.9 (a) Simulation results of position and leader-follower	
navigation system of two systems(a)	111
Fig 5.9 (b) Simulation results of position and leader-follower	
navigation system of two systems(b)	111
Fig 5.10 Dynamic behavior of Hybrid underwater glider	
(follower)	112
Fig 5.11 Dynamic behavior of Unmanned Surface Vehicle(leader) ..	113

Hybrid underwater glider Navigation system design and leader-follower Navigation system with Unmanned surface vehicle

Jeong, Sang Ki

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

Abstract

A significant concern of the underwater platform is to measure position and posture in the water accurately. However, due to environmental factors, limited use of GPS data is the most critical of the navigation data. For this reason, the navigation system in the water has a larger proportion of the indirect navigation system using the speed and the acceleration, and this method has a large error.

To solve this problem, this paper proposes a leader-follower navigation method to measure the position and posture directly in the water. Leader-Follower Navigation is a way of sharing location and distance information of Underwater Vehicle and Surface Vehicle. To do this, each navigation of the underwater vehicle and the Surface Vehicle is required, and a navigation algorithm is needed to connect the two navigation systems to one navigation system. Also, it is necessary to use USBL and underwater communication modem to know the distance between the underwater vehicle and Surface Vehicle.

In this study, a hybrid underwater glider was selected as an underwater platform, and a Surface platform was used as a Surface Vehicle. Hybrid underwater gliders designed the control system by applying neural network self - tuning PID control algorithm. And to create hybrid underwater glider navigation, 6 DOF based motion equations and ARS (Attitude Reference System) were designed. ARS is implemented with Ring laser gyroscope, a geomagnetic sensor and extended Kalman filter. The Unmanned Surface Vehicle was implemented by applying GPS based navigation. And the Leader-Follower Navigation, which connects two navigation systems together, is implemented using a neural network-PID parallel controller.

To verify the validity of the proposed Leader-Follower Navigation, the simulation was performed using Matlab / Simulink, and experiments were conducted based on the simulation results.

KEY WORDS: leader-follower navigation, hybrid underwater glider, Unmanned surface vehicle, neural network control, PID control

제1장 서론

1.1연구배경

무인수상정(unmanned surface vehicle, USV)은 무인잠수정(unmanned underwater vehicle, UUV) 과 함께 해양환경 조사의 무인화 추세에 따라 무인 환경 관측 시스템을 구성하는 주요 구성 장비이다. (정상기 외, 2016)

해외와 달리 국내에서는 UUV나 UAV보다 비교적 늦게 연구가 수행되었지만, 자율운항 및 원격통제에 필요한 다양한 기술들이 점차 고도화되어감에 따라 무인 해양환경 관측(UUV, UAV)과 연계된 환경관측 수행연구도 주목받고 있다. 무인수상선 및 UUV의 최근 연구 동향은 지상 통제소나 모선 간의 통신 거리를 증가시켜 무인수상선을 활동 범위를 넓히고, 무인수상선과 유기적인 협력을 통해 UUV에 다양한 센서들을 탑재하여 감시 및 정찰 임무 범위를 확대하는 연구가 수행되고 있다. 또한, 기후변화 등 급변하는 지구 환경변화에 대해 해양 물리탐사를 통한 전 지구적 해양자료 수집이 어느 때보다 증대되었으며 방대한 해양자료획득을 위해 다양한 해양탐사 위성이 지구를 관측하고 있다. 근래에 한국에서도 해양위성 영상 자료획득을 통해 한반도 및 관련 지역에 대한 광역적인 해양자료를 수집할 수 있게 되었지만, 해양의 표층에 대한 자료들만 획득할 수 있을 뿐 바닷속의 역동적인 변화에 대한 자료를 획득할 수는 없다. 따라서 수중에서의 자료를 취득하기 위해 많은 수중 장비들이 개발되어왔다.(Carlos Canudas de wit, et al.,2000)

현재까지 개발된 수중 관측 장비는 수중에서 자신의 정확한 위치 및 자세를 계측하기 위해 여러 방법을 연구하였다. 이러한 연구로 수중에서의 항법은 제한적인 환경조건을 어느 정도 극복하며 발전해왔다. 하지만 수중항법은 육상항법 및 항공항법과는 비교되지 않을 정도로 제약조건이 많으며 큰 오차를 내포하고 있다. 그 이유는 육상과 항공에서 정확한 정보를 제공해주는 GPS를 사용할 수 없기 때문이다. 따라서 추측항법과 지형대조 항법 등의 다양한 복합 센서를 이용

한 항법에 관한 연구가 활발히 진행되었고 그 결과로 육상 및 항공 항법과 같이 어느 정도의 오차를 내포하는 항법을 구현할 수 있었다. 하지만 이러한 방식은 간접적인 방식으로 자신의 위치 및 자세를 계측하는 방식으로 운용한 경에 따라 많은 제약이 따른다. (Eriksen, C.C. et al., 2001)

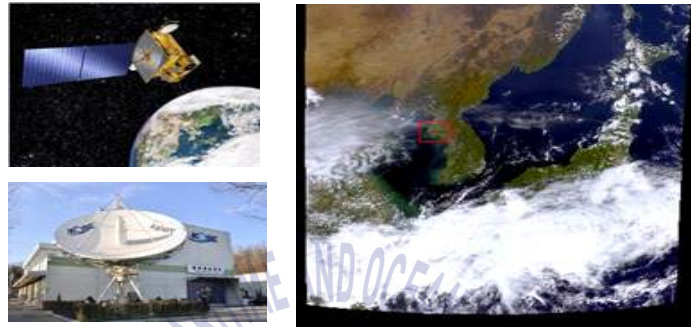


Fig 1.1. Ocean observation satellite

이러한 요구에 의해 바닷속의 물리적인 상태 자료를 광범위하게 획득하기 Fig. 1.2와 같이 수직 관측뜰게(Profile ARGO Float)를 이용하여 전 지구적으로 바닷속 물리 자료를 관측하고 있다. (박요섭 외, 2012)



Fig 1.2. ARGO Float

전 세계적으로 3천개 이상의 수직 관측뜰게가 수중 해양자료를 측정하여 통신 위성을 통해 자료를 수집하고 있다. 그러나 수직 관측 뜰게는 스스로 이동할 수

있는 능력이 없으므로 여러 대가 투입되어 광역적 조사를 수행할 수는 있지만 원하는 위치에 대한 정밀한 환경조사는 불가능하며 이동할 수 없는 기기이므로 유실률(3년 40%)이 대단히 높아 계속하여 새로운 기기를 투입하고 있는 실정이다.

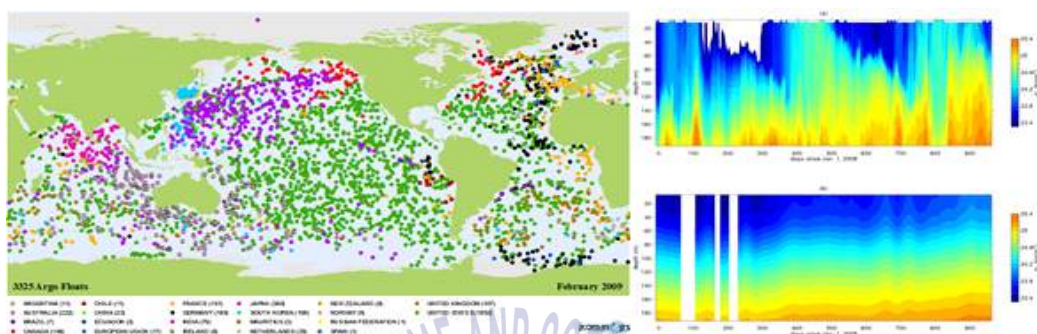


Fig 1.3. ARGO Float Distribution and Collection Materials

최근에는 대형 AUV를 이용하여 수중 해양자료 수집이 시도됨. 최근 개발된 대형AUV는 탁월한 조정성과 수평 이동 성능, 그리고 300km 이상의 운항 거리를 가지므로 멀티 빔등 다양한 해양수중자료를 수집하는 데 활용되고 있으나 고가의 AUV를 이용하여 광역적인 수중 해양자료를 취득하는 것은 비용상 불가능하며, AUV의 자율주행 기능을 가지고 장기간 먼 거리를 탐사할 수 있는 새로운 자율주행 무인탐사체가 요구되고 있다. (Webb, D.C., Simonetti, P.J., & Jones, C.P., 2001)

하이브리드 수중글라이더는 이러한 요구를 만족하게 하는 새로운 수중 탐사체로서, 수직 관측 뜰게와 같이 수직으로 부력을 조절하여 움직이며, Autonomous Unmanned Vehicle(AUV)와 같이 사용자가 제어 가능한 경로에 대해서 자율 주행이 가능하고, 이러한 특징으로 수중글라이더는 현재 다수의 국가와 연구소에서 활용되고 있으며, 해양관측용도 뿐 아니라 군사적인 목적으로도 활발히 개발 활용되고 있다.(Stommel, H., 1989)

하지만 현재 시판되는 상용 글라이더의 수중항법은 각 way point 에 도달했다

고 생각되는 지점으로 부상하여 Global Positioning System(GPS)데이터를 입력받아 다음 way point로 이동하는 방식을 사용하고 이는 Fig. 1.4와 같이 먼 거리를 운용할 수 있지만 정밀한 항법제어가 되지 않는다.

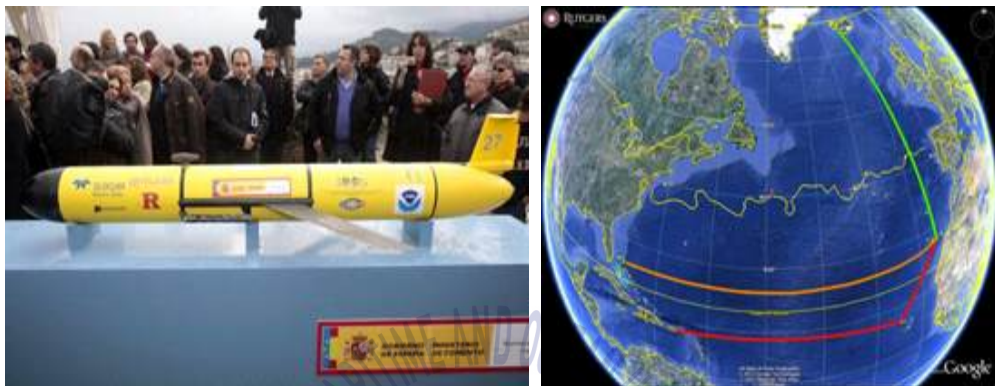


Fig 1.4. (Left) Slocum Glider, (Right) Movement trajectory of Slocum

따라서 수중에서 정밀한 위치계측 및 무인 수상선과의 협력제어를 통해 위에 열거된 장점을 가진 하이브리드 수중글라이더의 수중에서의 위치를 정확히 계측해 낼 수 있는 항법 시스템을 소형 Ultra Short Base Line(USBL)과 GPS, 그리고 지자기 센서 및 Ring Laser Gyro(RLG)를 이용하여 수상, 수중 협력제어 시스템을 연구하였다. (정상기 외, 2015), (Joshua G. Graver, 2005)

1.1.1 무인 해양운동체

수중글라이더는 2000년대 초반 미국에서 최초 개발되어 소개되었으며 3종 (Slocum, Spray, Sea glider)의 상용 글라이더를 판매되고 있다. 이후 다양한 수중 글라이더가 개발되었으며 용도에 따라 크게 환경조사용, 군사용으로 구분할 수 구분되고 학계에서도 활발히 연구개발이 진행되고 있다. (박종진, 2013), (Gianluca Antonelli, 2010), (Sherman, J. Davis, R.E., Owens, W.B., & Valdes, J. 2001)

Table 1 Specification of commercial underwater glider

이름	무게	속도	잠항수심	이동거리	제조사
Slocum	50kg	0.7knot	1,000m	4,000km	Teledyne Webb Research(미)
Spray	50kg	0.5knot	1,500m	4,000km	Bluefin Robotics(미)
Seaglider	50Kg	0.5knot	1,000m	4,000km	Kongsberg(노)
SeaExplorer	60kg	1.0knot	700m	1,000km	ACSA(프)



Slocum Electric



Spray



Seaglider



Sea Explorer

Fig 1.5. Commercial underwater glider

-하이브리드 수중 글라이더 (Hybrid Underwater Gilder-하이브리드 수중글라이더)

수중 글라이더는 부력을 조절하여 하강과 상승을 반복하며 추진력을 얻고 이를 통해 수중에서 활강하는 방식으로 이동하는 수중운동체로 이러한 수중글라이더에 수중 추진체를 더하여 AUV와 같은 움직임도 구현할 수 있는 운동체이다.

수중 글라이더의 이동원리는 Fig. 1.5와 같고 기본 운용 개념은 아래와 같다.

- ① 초기 상태로서 부력을 조절하여 물 위에 준비.
- ② 이동을 위해 부력을 조절하고 자세를 제어하여 하강 이동.

- ③ 일정 수심에 도달하면 부력을 조절하고 자세를 제어하여 상승 이동.
- ④ 새로이 명령받은 지점으로 진행하기 위해서 ②와 ③을 반복함.
- ⑤ 목표 지점에 도달하면 수면에서 통신할 수 있도록 안테나를 노출
- ⑥ 위성통신 및 무선통신을 이용하여 GPS 위치 및 수집된 자료를 전송 및 명령 대기. (Rudnick, D, L et al., 2004), (Smith, R.N. et al., 2011)

이러한 이동 방식은 수중 글라이더가 수표와 최저수심에서만 부력을 조절하여 추진하기 때문에 에너지 효율이 매우 높다. 또한, 수중에서 환경 데이터를 취득하기 위해 직선 이동이 필요한 경우가 발생하는데 이때 하이브리드 수중글라이더의 추진체를 이용하여 직선 이동을 실시하며 운항 중 더 정밀한 위치제어를 위해 추진체를 이용하기도 한다. 그리고 수중글라이더의 낮은 직진성과 느린 속도를 극복하기 위해 보조적으로 추진체가 사용된다.(Morton Gertler and Grant R. Hagen, 1967,)

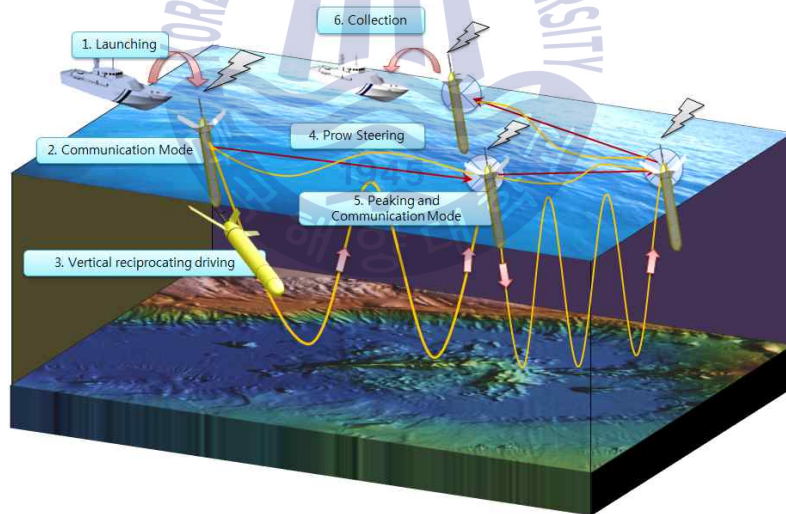


Fig 1.6 Underwater glider operation concept

-무인 수상선 (unmanned surface vehicle, USV)

무인수상선은 외부에서 원격조종이 가능한 수상선으로 본격적인 무인수상정 연구

가 수행된 1990년 이래로 해외에서 개발 및 연구되어 운용 중이며 이스라엘에서 2005년경 개발된 Stingray는 3.2m 전장에 40 knots로 이동하며 소형이면서 고속으로 연안 감시 수행이 가능하다. 또한, 2003년경 개발된 Protector는 9m의 전장에 50knots의 속도로 고속이동이 가능하며 특히 ‘Mini-Typhoon’ 으로 명명된 무장을 탑재하여 고속이동 시에도 정확하게 목표물을 타격할 수 있는 사격시스템을 개발하였다. 또한, 환경 모터링을 목적으로 Australia CSIRO에서 Autonomous Surface Vehicle(ASV)를 제작하고 영상을 기반으로 하는 도킹연구를 진행하였다. 이처럼 현재 활발히 운용되는 무인수상정은 Fig. 7과 같으며, Table 2에 현재 개발된 주요 무인수상정의 사양을 정리하였다.



Fig. 1.7. Overseas Development of USV

Table 2 Specifications of USV

	L [m]	B [m]	Displ [t]	V [kn]	Payload [t]
QST-35 Septar	17.00	4.50	19.00	35	10
Roboski SDST	2.70	1.20	0.20	42	0.16
Spartan	7.00	3.00	4.00	30	0.7
Sea Fox	5.00	-	0.64	40	-
Protector	9.00	-	-	40	1

1.2 연구목표

본 연구에서는 기존의 수중항법 시스템에서 물리적 환경으로 인해 배제되었던 GPS 정보를 수중에서 활용할 수 있도록 수상선과 USBL 그리고 수중 통신모뎀을 이용하여 기존 수중항법에 오차를 감소시킬 수 있는 알고리즘을 연구하였다.

수상과 수중 플랫폼을 함께 운용하여 두 시스템의 유기적인 임무를 수행할 수 있는 운용방법 및 알고리즘을 연구하였고, 이를 위해 수중운동체인 하이브리드 수중글라이더의 6자유도 운동 방정식 및 유체력 계수를 포함하는 시뮬레이터를 설계하였고 운동성능 해석 및 일정 항법 미션을 수행할 수 있는 시스템을 구성하였다. 또한, 수상선은 3자유도 운동방정식 및 유체력 계수 등을 포함하는 시뮬레이터를 설계하였다. 수상선의 항법은 GPS 기반의 항법으로 설계하였으며 하이브리드 수중글라이더의 항법은 기존의 방식인 추측항법을 이용하여 각각의 항법 알고리즘을 구성하였다. 최종적으로 이 두 시스템이 협력하여 운항할 수 있는 협력항법과 제어에 대한 연구를 수행하였다.

수중항법에서 난제인 항법 오차를 근본적으로 줄일 수 있는 대안으로 장시간 운용해도 누적오차가 없는 수상선의 GPS 데이터를 기반으로 USBL을 이용하여 수중 글라이더의 상대 위치를 계측하여 누적 오차를 보정할 수 있다. 또한, 두 시스템을 협력적으로 운영하면 여러 장점을 가질 수 있다. 수중과 수상 운동체를 동시에 운용하기 때문에 임무 수행 영역을 확장할 수 있으며 수중 운동체의 제한적인 통신 거리를 늘릴 수 있다.

이러한 장점이 있는 협력 항법 및 제어 연구를 통하여 일정 조건에서 두 시스템의 협력제어를 통해 일정 자세 및 위치를 유지하며 제어할 수 있는 알고리즘 연구와 이를 구현하는 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였고 타당성을 실험을 통해 연구한 내용을 검증하였다.

1.3 논문구성

본 논문은 다음과 같이 구성 되어 있다.

2 장 하이브리드 수중글라이더 동력학 모델

2장은 연구에 사용되는 하이브리드 수중글라이더의 운동 방정식 및 유체력에 관해 설명하였으며 신경망 PID 제어기를 적용한 시뮬레이터를 설계하여 운동성능 해석 및 거동 특성에 대해 기술하였다.

3 장 수상선의 동력학 모델

본 연구의 사용되는 무인 수상선의 항법 알고리즘을 구현하기 위해 하드웨어 시스템을 설계하였고 알고리즘 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

4장 하이브리드 수중글라이더와 무인 수상선의 시스템 구성

협력제어 시스템을 설계하기 위해 필요조건을 설명하고 협력제어를 하는 두 운동체 각각의 항법을 특수한 조건에 의해 하나의 항법으로 두 운동체의 위치를 공유하는 조건을 설명한다. 또한 조건을 만족하는 환경에서 하이브리드 수중글라이더와 무인수상선의 운동에 대해 기술하였다.

5장 하이브리드 수중글라이더(follower)와 무인 수상선(leader)의 협력항법

신경망-PID 병렬제어기를 적용하여 하이브리드 수중글라이더(follower)와 무인 수상선(leader)의 협력항법에 관해 설명하고 시뮬레이션 결과를 기술 한다.

6장 결론

본 연구의 주요 결과 및 향후 과제에 관해 기술하였다.

제 2 장 하이브리드 수중글라이더 동력학 모델

수중의 3차원 공간에서의 거동을 운동을 표현하기 위해 기준 좌표계인 지구 고정 좌표계(Earth-fixed Coordinate System)과 하이브리드 수중글라이더의 부력중심에 고정된 선체 고정 좌표계(Body-fixed Coordinate System)를 Fig. 2.1과 같이 나타냈다. 이는 무인잠수정은 기하학적 대칭을 가지고 있으며, 기하학적인 대칭면에 부력중심이 존재하기 때문에 선체고정 좌표계에 부력중심을 위치시키면 대칭성을 이용하여 6자유도 운동 방정식을 단순화시킬 수 있고 운동해석이 용이하다. 따라서 하이브리드 수중글라이더를 강체(Rigid Body)로 가정하고 공간상에서 그 운동을 고려하기 위해 좌표계를 설정하였다. 기준이 되는 지구 고정좌표계 $O_E - x_E y_E z_E$, 고정좌표계는 강체내부의 부력중심을 기준으로 하여 $O_B - x_B y_B z_B$ 를 설정하였다.

(Timothy Presterio, 2001)

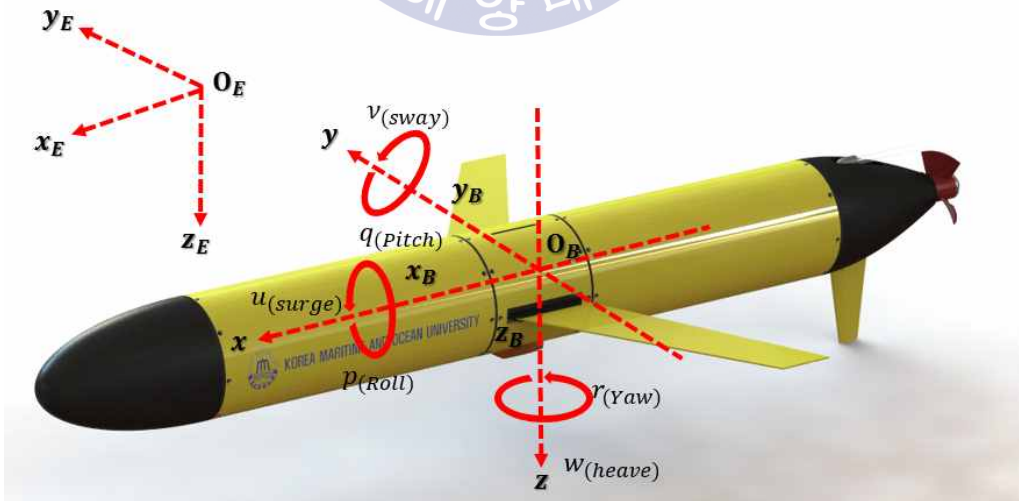


Fig 2.1 Hybrid Underwater Glider Coordinate System

설정된 선체 고정 좌표계는 선수 방향을 x축 우현 방향을 y축 그리고 수심 방향을 z축으로 하는 오른손 좌표계를 사용하였다. 또한 각축의 3자유도 병진운동을 표현할 수 있는 위치 및 속도, 3자유도 회전을 표현 할 수 있는 각도와 각속도 그리고 운동변수뿐만 아니라 작용하는 힘과 모멘트를 Table 2.1에 정의하였다.(Graver, J. and Leonard, N. E.2001)

Table 3 D.O.F motion of the underwater vehicle

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

2.1 하이브리드 수중글라이더 기구학(Kinematics)

기준 좌표계인 지구 고정 좌표계에 대한 선체 고정좌표의 운동을 묘사하여 운동 방정식을 유도할 수 있고 지구 고정 좌표계와 선체 고정 좌표계는 표현된 각각의 운동변수들의 회전 행렬을 통해 서로 변환이 가능하다.(Thor I. Fossen, 1994), (Isa, K. and Arshad, M. R.2011)

식 2.1은 선체 좌표계에서 운동 변수들과 지구 좌표계에서의 운동변수 사이의 변환을 나타낸다.

$$\dot{\eta} = R(\eta)v, \quad \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

식 2.1에서 $R(\eta)$ 은 두 좌표 사이의 변환행렬이며 지구고정⁽¹⁾ 좌표계와 선체 고정 좌표계에 대한 하이브리드 수중글라이더의 위치 벡터 및 속도 벡터는 식 2.2와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \eta &= [\eta_1 \ \eta_2]^T & \eta_1 &= [x \ y \ z]^T & \eta_2 &= [\phi \ \theta \ \psi]^T \\ v &= [v_1 \ v_2]^T & v_1 &= [u \ v \ w]^T & v_2 &= [p \ q \ r]^T \end{aligned} \quad (2.2)$$

식 2.2에서 η_1, η_2 는 각각 지구고정 좌표에서의 하이브리드 수중글라이더의 위치와 자세를 나타내는 벡터이며, v_1, v_2 는 선체 좌표계의 하이브리드 수중글라이더 선속도 벡터와 각속도 벡터이다.

$$R_1(\eta_1) = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\psi + \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & -\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

식 2.3은 선속도를 선체고정 좌표계에서 지구고정 좌표계로 변환하기 위한 변환 행렬로 오일러 각을 이용하여 표현할 수 있다. 그리고 선체 좌표계에서 각속도 벡터를 지구고정 좌표계로 변환하기 위한 행렬은 식 2.4와 같다.

$$R_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

식 2.4에 표현한 변환 행렬은 $\theta = \pm 90^\circ$ 에서 $R_2(\eta_2)$ 가 정의되지 않는 Gimbal-lock 현상이 발생한다. 이는 회전 행렬을 객체의 변환행렬과 각각 순서대로 x, y, z로 곱할 때 x축을 90° 회전 후 y축으로 90° 회전한 것이 y축으로 90° 회전 후 z축으로 90° 회전한 값이 같다. 따라서 세 개의 축 각을 이용하여 항상 순서대로 회전을 하면 위와같이 한 개의 축이 쓸모없게 된다.

수중 운동체가 수중에서 운항 중 Pitch 각(θ)이 $\pm 90^\circ$ 가 되는 경우는 회박하나 수중글라이더는 위아래로 사인 웨이브를 그리며 전진하기 때문에 Gimbal-lock 현상을 사전에 방지할 필요가 있다. 그래서 식 2.5와 같이 오일러 각을 사원수(Quaternion)으로 변환한다.

$$R_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$= \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi \\ \sin\phi\cos\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\theta\sin\psi \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\cos\theta\sin\psi \\ \cos\phi\cos\theta\sin\psi - \sin\phi\sin\theta\cos\psi \end{bmatrix}$$

2.2 하이브리드 수중글라이더 동력학(Dynamics)

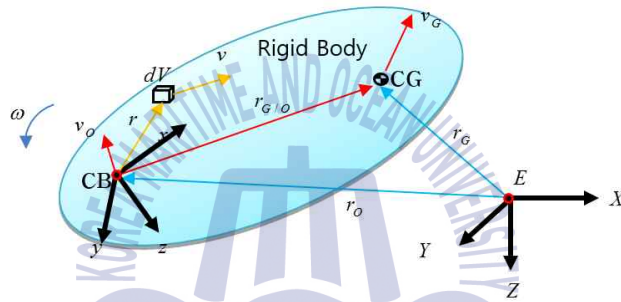


Fig 2.2 Coordinate system and position vector for modeling of Rigid body

수중에서 하이브리드 수중글라이더의 거동을 묘사하기 위해 강체 동력학과 유체 동력학을 모두 고려해야 하고 유체동력학적인 측면에서 “강체에 작용하는 유체에 의한 힘과 모멘트는 중첩될 수 있다.” 라고 가정하고 강체의 동역학에 적용한다.(김기훈, 2005)

일반적인 강체에서의 병진운동의 운동방정식은 식2.6과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Sigma \vec{F}_G = \frac{d}{dt}(\vec{L}_G), \quad m[\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)] = F_0 \quad (2.6)$$

회전 운동의 운동방정식은 식 2.7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Sigma \vec{M}_G = \frac{d}{dt}(\vec{H}_G), \quad I_0 \cdot \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \cdot \omega) + m r_G \times [\dot{\nu}_0 + \omega \times \nu_0] = M_0 \quad (2.7)$$

위 식 2.7에서 m 은 질량이며 위첨자 $\cdot$ 는 고정 좌표계의 미분이다. 위 식들을 이용하여 수중에서의 하이브리드 수중글라이더를 포함하는 강체의 6자유도 운동 방정식은 식 2.8과 같다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_g(p^2 + r^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(pr + \dot{p})] &= \Sigma Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= \Sigma K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{v} - uq + vp)] &= \Sigma M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\ + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= \Sigma N \end{aligned} \quad (2.8)$$

식 2.8에서 x_g, y_g, z_g 는 선체의 질량 중심 위치를 나타내며, 식의 좌측 항은 질량이 m 인 물체의 거동을 나타내고 우측 항은 외력을 나타낸다. 우항의 외력에서 X, Y, Z 는 선체의 병진운동에 대한 외력이며, K, M, N 는 회전운동을 할 때 발생하는 외력이다. 선체의 중심을 기준으로 하이브리드 수중글라이더는 대칭이므로 원점에서의 관성 모멘트는 식 2.9와 같이 표현된다.

$$I_o = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

하이브리드 수중글라이더는 부력제어기 의해서 질량 중심과 부력중심이 변하고

자세제어기에 의해서 질량 관성 모멘트가 실시간으로 변하게 된다. 실시간으로 변화되는 변화량을 모델링하면 다음과 같다. (김동희 외, 2014.), (Tran, Ngoc-Huy, Choi, H. S., et. al. 2015)

2.2.1 부력엔진 역학해석

Fig 2.3 에서 O는 무게중심이고 선체 고정좌표계 뒷부분을 고정체적 $V_{fix1,2}$ 으로 두고 앞부분을 부력제어기에 의해 변화하는 체적 V_{var} 으로 하면 부력중심 r_{cb} 는 식 2.10과 같이 나타낼 수 있다.

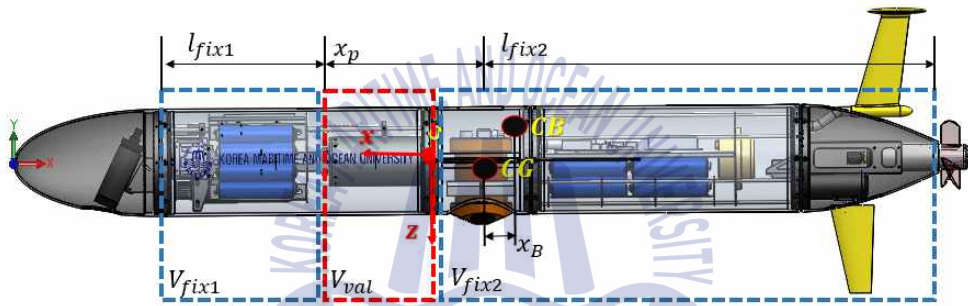


Fig 2.3 Configuration of center of mass and buoyancy center of hybrid underwater glider

$$\vec{r}_{cb} = [x_B, 0, 0]^T = \left[\frac{V_{var} \frac{x_p}{2} + (V_{fix1} + V_{fix2})l_{fix1} + l_{fix2}}{V_{var} + (V_{fix1} + V_{fix2})}, 0, 0 \right]^T \quad (2.10)$$

Fig 2.3에서 x_B 는 선체무게중심에서 부력중심까지의 거리이고 x_p 는 부력엔진 피스톤의 끝단에서 무게중심까지의 거리이다.

2.2.2 질량이동장치 역학해석

선체 고정좌표계의 원점 O에서 배터리 팩의 질량 중심까지의 벡터 $\vec{r}_m$ 은 내부 배터리팩의 이동에 의해 실시간으로 변화하게 되며 이 변화에 의해 선체의 질량

중심 $\vec{r}_{CG}$ 의 변화와 질량관성모멘트 I_o 의 변화가 발생하며 Fig 2.4와 식 2.12~ 식 2.14같이 표현할 수 있다.

무인 수중글라이더의 전체 질량 m_{total} 은 무인 수중글라이더의 동체 질량 m_h 와 내부의 고정된 질량 m_s 그리고 내부의 이동질량 m_m 로 나눌 수 있다.그러므로 m_{total} 은 식2.11과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{total} = m_h + m_s + m_m \quad (2.11)$$

선체고정좌표계의 원점에서 각각의 질량 중심까지 위치 벡터를 구할 수 있으며, 이를 질량 중심의 정의를 이용하여 전체 무인 수중글라이더의 질량 중심까지의 위치벡터를 구하게 되며 식 2.12 와 같이 나타냈다.

$$\vec{r}_{cg} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \frac{m_h \vec{r}_h + m_s \vec{r}_s + m_m \vec{r}_m}{m_{total}} \quad (2.12)$$

식 2.12에서 $\vec{r}_m$ 은 무인 수중글라이더에서 실시간으로 변하는 변수이고 설계된 수중글라이더의 파라미터와 식 2.13를 사용하여 $\vec{r}_m$ 을 구하게 된다.

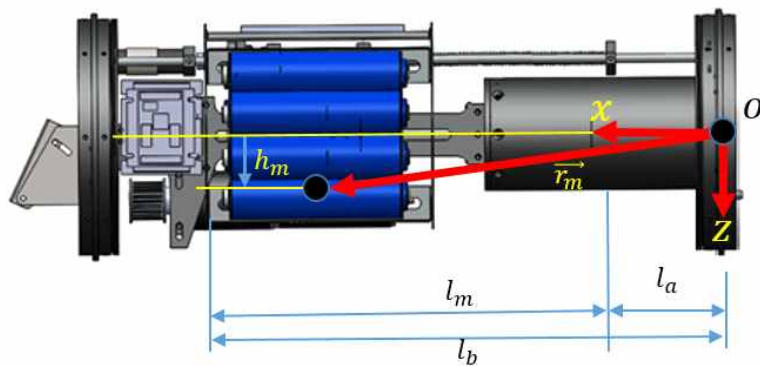


Fig. 2.4 Length information of attitude control device

$$\vec{r}_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a + l_m \\ 0 \\ h_m \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

내부질량이동 길이 l_m 에 따라 x_m 이 변하게 된다. 무인 수중 글라이더의 질량 중심의 변화에 따른 전체 질량 관성모멘트의 변화는 식 2.14와 같이 표현된다.

$$I_0 = (I_h - m_h \hat{r}_h \hat{r}_h) + (I_s - m_s \hat{r}_s \hat{r}_s) + (I_m - m_m \hat{r}_m \hat{r}_m) \quad (2.14)$$

식 2.14의 I_h , I_s , I_m 은 앞에서 부터 무인 수중글라이더의 동체, 내부의 움직이지 않는 질량, 내부의 이동질량의 질량관성모멘트 이고 m_h , m_s , m_m 은 각각의 질량이다. 또한 $\hat{r}_h$, $\hat{r}_s$, $\hat{r}_m$ 은 질량 중심까지의 벡터를 나타내며 벡터($\vec{\cdot}$) 기호를 쓰지 않고 ($\hat{\cdot}$)의 기호로 표현 한 것은 왜대칭행렬을 표현하고 벡터의 외적을 위해 사용하였다.

2.2.3 유체력

수중에서 하이브리드 수중글라이더의 운동을 묘사하기 위해 강체 동력과 함께 외력 항에 작용하는 힘인 유체력을 고려해야 한다. 수중에 작용하는 유체력은 유체정역학적 힘(Hydrostatic)및 관성 유체력(Inertial), 점성 감쇠 유체력(Damping) 그리고 제어 유체력(Control)과 이에 따른 각각의 모멘트들이 있다.(Thor I. Fossen, Tor Arne Johansen and Tristan Perez, 2008)

본 논문에서 하이브리드 수중글라이더에 작용하는 유체력은 글라이더의 형상과 관계가 있으며, 글라이더의 운동 여부와 관계없이 작용하는 정유체력과 글라이더의 가속/감속 운동에 의해 발생하는 동유체력으로 나눌 수 있다. 정유체력은 부력과 중력에 의한 항으로 나타내어지며 동유체력은 부가질량, 선형 감쇠, 비선형 감쇠 등 여러 가지 항으로 나타내어진다. 동유체력에서 가장 지배적인 항의 유체력 계수는 부가질량, 선형 감쇠, 비선형 감쇠 항이다. 이외에도 글라이더의 운동에 따라 또는 글라이더의 형상에 따라 각 방향의 운동들이 서로 연성 관계

를 갖는 유체력 계수도 존재한다.

- 관성유체력 부가질량(Added mass and inertia)

수중에서 무인 잠수정이 가속도를 가지고 수중에서 운동할 때 무인 잠수정에 영향을 받는 정도를 부가질량에 의한 유체력이라 하며, PMM(Planar Motion Mechanism)과 같은 실험적인 방법이나 이론적인 방법으로 도출이 가능하다. 부가 질량에 대한 유체력의 크기는 가속도에 비례한다. 그리고 하이브리드 수중글라이더는 대칭을 이루는 형상을 가지고 있으므로 부가 질량에 대한 유체력행렬은 식 2.15와 같이 상수로 단순화하여 표현할 수 있다. (Seo, D.C., Jo, G.N., Choi, & H.S., 2008)

$$M_{add} = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 & 0 & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & -Z_w & 0 & -Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_w & 0 & -M_q & 0 \\ 0 & -N_v & 0 & 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

식 2.15에 표현한 X_u 등의 유체력 계수들은 수중무인 체 이기 때문에 파도의 영향을 받지 않는 수중이기 때문에 상수로 가정 하는 것이 일반적이며 본 논문에서는 실험적인 방법으로 구한 계수를 차용하였다.

- 점성 유체감쇠력 (Hydrodynamic damping)

수중에서는 임의의 속도로 운동하는 물체의 경우 유체와의 상대적 속도로 인해 점성에 의한 유체감쇠력이 발생한다. 유체에 의한 감쇠는 고속으로 운항 시 비선형적 특징을 가지며 각 항에 연성 되어 복잡한 특성을 나타낸다. 하지만 실험적, 경험적 데이터의 부족과 계측의 어려움으로 비선형 연성 관계를 가지는 점성유체 감쇠력을 구하는 것은 매우 까다롭다. 따라서 하이브리드 수중글라이더의 선회가 전후, 좌우가 대칭이기 때문에 비대각 항에 관한 유체력을 무시 할 수 있

고, 또한 2차항 이상의 고차 항은 영향이 적다는 가정에 따라 2차 이상의 성분은 무시하였다. 이러한 가정을 바탕으로 식 2.16과 식 2.17같이 선형 점성유체감쇠행렬과 비선형 감쇠유체행렬을 표현하였다.(Sighard F. Hoerner and Henry V. Borst, 1985)

$$D_L = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$D_{N-L} = \begin{bmatrix} -X_{u|u|}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{v|v|}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z_{w|\omega|}|\omega| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{p|p|}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M_{q|q|}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{r|r|}|r| \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

위 식에서 D_L 은 선형 점성유체감쇠력행렬 D_{N-L} 은 비선형 점성유체감쇠력행렬을 대각성분만을 포함하는 형태로 표현 하였다.

2.2.4 제어 유체작용력 및 모멘트 (Hydrostatic fores and moments)

수중에서 운동하는 물체는 운동 상태와 상관없이 중력(W)과 부력(B)이 항상 작용하고 있으며 지구고정좌표계에서 표현한 유체작용력 및 모멘트를 회전형렬을 통해 선체고정좌표계로 식 2.18와 식 2.19같이 나타낼 수 있다.

$$F_{h-R}(\eta_2) = f_W(\eta_2) + f_B(\eta_2) = R_1^{-1}(\eta_2) \cdot W - R_1^{-1}(\eta_2) \cdot B \quad (2.18)$$

$$\therefore W = [0, 0, mg]^T, \quad B = [0, 0, \rho g \nabla]^T$$

$$M_{h-R}(\eta_2) = R_1^{-1}(\eta_2) \cdot r_{cg} \times f_W(\eta_2) - R_1^{-1}(\eta_2) \cdot r_{cb} \times f_B(\eta_2) \quad (2.19)$$

위 식 2.18에서 g 는 중력 가속도, ρ 는 유체의 밀도이며 ∇ 는 하이브리드 수중글라이더의 배수량을 나타낸다.

여기서 배수량은 부력제어장치를 이용하여 체적의 변화를 주는 형태로 운동하는 하이브리드 수중글라이더의 특성상 실시간으로 변하는 변수이고 이 배수량은 하이브리드 수중글라이더의 부력제어장치의 유체 토출양에 따라 변한다. 따라서 부력 제어장치의 유체 토출양은 식 2.20과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_p = \frac{Dw - Dw_{nom}(1 - \eta_v)}{A} \quad (2.20)$$

식 2.20에서 A 는 부력엔진의 단면적, q 는 단위시간당 토출 되는 유량, D 는 펌프의 회전수당 토출유량, w 는 펌프에 연결된 모터의 회전 각속도이며, w_{nom} 은 모터의 공칭 각속도 η_v 는 펌프의 용적 효율을 나타낸다.

위 식 2.18, 식 2.19를 6자유도 운동 방정식에 대하여 표현하면 식 2.21과 같이 나타 낼 수 있다.

$$G_v(\eta) = \begin{bmatrix} F_{h-R}(\eta_2) \\ F_{h-R}(\eta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W-B)\sin\theta \\ (W-B)\cos\theta\sin\phi \\ (W-B)\cos\theta\cos\phi \\ -(y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi - (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi \\ -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi \\ -(x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi - (y_g W - y_b B)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

하이브리드 수중글라이더는 기존 수중 글라이더에 추진기와 방향타(Rudder)가 적용된 수중 운동체이다. 따라서 추진기가 작동 중일 때에 다음의 추진계수를 고려하여야 하며, 각각의 계수는 선체의 축 방향에 가해지는 외력 성분과 회전에 따른 모멘트 성분으로 나타내어진다.

$$X_{prop} = -X_{u|u}|u| \quad (2.22)$$

$$K_{prop} = (y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi + (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi \quad (2.23)$$

또한, 유체작용력은 하이브리드 수중글라이더의 운항 중 방향타(Rudder)의 작동에 따른 타력과 자세제어기의 작동에 따라 무게중심 변화로 인한 날개(Blade)의 받음각의 변화에 따라 발생하는 외력이다. 따라서 선체 형상에 의해 발생하는 양력을 고려하면 식 2.24과 같고

$$L_{body} = -\frac{1}{2}\rho A_p c_{bd} u^2 \quad (2.24)$$

속도에 대해 식 2.25의 비례관계가 생긴다.

$$Y_{uvl} = Z_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{yd} \quad (2.25)$$

ρ 는 선체 주변의 밀도, A_p 는 선체의 단면 투영면적, u 는 속도, c_{bd} 는 선체의 양력 계수를 의미한다. Hoerner에 의하면 선체길이 및 직경의 비가 약 1:10일 때, 양력 계수는 0.03 이다. 이때 발생하는 선체의 모멘트는 다음의 식 2.26과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{uwl} = -N_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{bd} x_c \quad (2.26)$$

x_c 는 선체가 회전함에 따라 회전 중심과 기하학적 중심 간의 거리이다.

- 유체력을 포함한 하이브리드 수중글라이더 6자유도 운동방정식

앞에서 고려된 각각의 계수들을 외력성분으로 대입하면 아래 식 2.27~식 2.32과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - (W - B)\sin\theta \quad (2.27)$$

$$Y = Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + (W - B)\cos\theta\sin\phi \quad (2.28)$$

$$Z = Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + (W - B)\cos\theta\cos\phi \quad (2.29)$$

$$K = K_{p|p}|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} + (y_G W - y_B B)\cos\theta\cos\phi - (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \quad (2.30)$$

$$M = M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw - (z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi \quad (2.31)$$

$$N = N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi + (y_G W - y_B B)\sin\theta \quad (2.32)$$

위 식은 무인 수중글라이더에 작용하는 6자유도 유체력을 나타낸 것이며, 선형 감쇠, 비선형 감쇠, 부가질량 항의 유체력 계수를 나타낸다. 본 연구에서는 주요 유체력계수들을 PMM 실험, CFD해석 및 경험식을 사용하여 구하였다. 위 수식에 사용된 계수는 Table 4에 정리 하였다.(John N. Newman, 1977)

Table 4 Hydrodynamic Coefficients

Index	Value	Units
$X_{u u }$	-5.32	kg/m
$Y_{u u }$	-227.64	kg/m
$Z_{u u }$	-242.04	kg/m
$M_{u u }$	10.50	kg
$N_{v v }$	-15.71	kg
$Y_{r r }$	-5.87	$kg-m/rad^2$
$Z_{q q }$	11.15	$kg-m/rad^2$
$M_{q q }$	-11.40	$kg-m^2/rad^2$
$N_{r r }$	-7.73	$kg-m^2/rad^2$
$\dot{X}_u$	-0.88	kg
$\dot{Y}_v$	-64.16	kg
$\dot{Z}_w$	-71.23	kg
$\dot{M}_w$	-4.39	$kg-m$
$\dot{N}_v$	-2.78	$kg-m$
$\dot{Y}_r$	-2.78	$kg-m/rad$
$\dot{Z}_q$	-2.68	$kg-m/rad$
$\dot{M}_q$	16.06	$kg-m^2/rad$
X_{prop}	00	kg/m
Y_{uv}	-138.24	kg/m
Y_{ur}	6.91	kg/rad
Z_{uw}	-30.72	kg/m
Z_{uq}	-18.43	kg/rad
M_{uw}	6.91	kg/m
M_{uq}	-0.35	$kg-m/rad$
N_{uv}	-20.56	kg/m

2.3 하이브리드 수중글라이더의 제어기 설계

하이브리드 수중글라이더는 기본적으로 부력에 의해 상하운동을 기본으로 전진 추력을 얻는다. 하이브리드 수중글라이더에 장착된 추진체는 주된 이동수단이 아니라 특정 미션에 관여하는 보조적인 추진체로 활용된다. 따라서 수중에서 운항할 경우 특정한 피치각도 또는 특정 방향으로 운항해야 할 필요가 있으며 이를 위하여 제어 시스템을 설계하였다. (김용백 외, 2014), (Jon Erling Gorset Refsnes, 2007), (Maybeck, P.S., 1996)

2.3.1 하이브리드 수중글라이더 자세제어 시스템 알고리즘

일반적으로 현재 상용제품으로 사용되는 수중 글라이더는 운용 수심이 최소 20m 깊이 이상의 수심에서 운용하는데 그 이유는 20m 아래의 바다는 표층의 외란 즉 파도 및 풍랑의 영향을 거의 받지 않는 깊이로 큰 해류에 의한 영향을 받아 하이브리드 수중글라이더의 위치를 대략 예측할 수 있다. 또한, 수중 글라이더의 최대 장점인 장기간 운용을 위해서는 움직임을 최소화하는 제어 기법이 필요하며 일정 범위 안의 각도를 제어하여 움직임을 최소화할 알고리즘이 필요하다. 따라서 최소한으로 움직일 수 있는 자가조정 PID 제어기를 적용하였다.

신경망 자가조정 PID는 기존의 PID 제어기를 응용하여 PID 이득을 가변적으로 변화시켜 정밀하고 비선형 요소나 외란에 유연하게 적응하는 제어기법이다.

(Yoshihiko Nakamura, 1991)

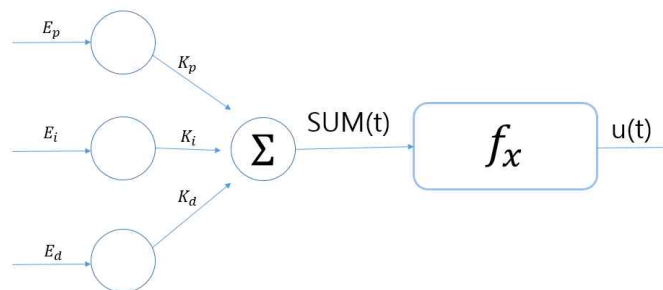


Fig 2.5 Neural network PID control algorithm

Fig 2.5에서 3개의 입력은 오차 값, 오차의 미분 값, 오차의 적분 값이며 각각의 입력은 비선형 활성화 함수인 시그모이드 함수로 입력된다.

본 연구에 사용 되는 시그모이드 함수는 식 2.33과 같다.

$$f(x) = \frac{2(1 - e^{-xY_g})}{Y_g(1 + e^{-xY_g})} \quad (2.33)$$

식 2.33에서 Y_g 는 곡률 형태를 결정하는 상수로 Y_g 값이 0.5 이상이면 1이 될 확률이 더 높다.

Fig. 2.5 에서 PID제어기의 계인은 가중치 값으로 설정되어 있고 역전파 알고리즘을 이용하여 학습오차를 최소화 하였다.

출력층에서 시그모이드 함수 $f(x)$ 로 입력되는 입력신호는 식 2.34과 같다.

$$sum(t) = k_p(t)e_p(t) + k_i(t)e_i(t) + k_d(t)e_d(t) \quad (2.34)$$

위 식에서

$$e_p(t) = ref(t) - m(t)$$

$$e_i(t) = \int e_p(t)$$

$$e_d(t) = \frac{de_p(t)}{dt}$$

식 2.34에서 $ref(t)$ 와 $m(t)$ 는 각각 목표값과 측정값이다.

점진하강(Gradient Decent)을 이용하여 신경망 가중치를 식 2.35를 이용하여 계속 업데이트 한다.

$$k_p(t+1) = k_p(t) - \eta_p \frac{\partial E}{\partial k_p}$$

$$k_i(t+1) = k_i(t) - \eta_i \frac{\partial E}{\partial k_i} \quad (2.35)$$

$$k_d(t+1) = k_d(t) - \eta_d \frac{\partial E}{\partial k_d}$$

식 2.35에서 η_p, η_i, η_d 는 학습율로 경험적으로 결정하는 값으로 시뮬레이션을 통해 설계인자로 보고 결정한다.

통상적으로 학습을 값이 커지면 학습은 빠르지만 성능이 좋지 못하고 너무 작으면 성능은 좋아지지만 시간이 오래 걸린다.

학습을 위한 학습 오차 값은 식 2.36과 같이 정의한다.

$$E(t) = \frac{1}{2} (ref(t) - m(t))^2 \quad (2.36)$$

점진하강(Gradient Decent)법의 편미분에서 체인룰을 이용하여 식 2.37과 같이 유도 된다.

$$\frac{\partial E}{\partial k_p} = \frac{\partial E}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial sum} \frac{\partial sum}{\partial k_p}$$

$$\frac{\partial E}{\partial k_i} = \frac{\partial E}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial sum} \frac{\partial sum}{\partial k_i}$$

$$\frac{\partial E}{\partial k_d} = \frac{\partial E}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial sum} \frac{\partial sum}{\partial k_d}$$

그리고

$$\frac{\partial E}{\partial m} = - (ref(t) - m(t)) = - e_{p(t)} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial u}{\partial sum} = \dot{f}(sum(t))$$

$$\frac{\partial sum}{\partial k_p} = e_p(t), \quad \frac{\partial sum}{\partial k_i} = e_i(t), \quad \frac{\partial sum}{\partial k_d} = e_d(t)$$

$$\frac{\partial m}{\partial u} = \frac{\Delta m}{\Delta u} = \frac{m(t) - m(t-1)}{u(t) - u(t-1)}$$

$$\dot{f}(sum) = \frac{4e^{-sum \cdot Y_g}}{(1 + e^{-sum \cdot Y_g})^2}$$

식 2.35~2.37까지 유도된 식을 이용하여 적응공식을 식 2.38과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 k_p(t+1) &= k_p(t) - \eta_p e_p(t) e_p(t) \frac{4e^{-sum \cdot Y_g}}{(1 + e^{-sum \cdot Y_g})^2} \cdot \frac{m(t) - m(t-1)}{u(t) - u(t-1)} \\
 k_i(t+1) &= k_i(t) - \eta_i e_i(t) e_i(t) \frac{4e^{-sum \cdot Y_g}}{(1 + e^{-sum \cdot Y_g})^2} \cdot \frac{m(t) - m(t-1)}{u(t) - u(t-1)} \\
 k_d(t+1) &= k_d(t) - \eta_d e_d(t) e_d(t) \frac{4e^{-sum \cdot Y_g}}{(1 + e^{-sum \cdot Y_g})^2} \cdot \frac{m(t) - m(t-1)}{u(t) - u(t-1)} \\
 \frac{\partial m}{\partial u} &= \frac{\Delta m}{\Delta u} = \frac{m(t) - m(t-1)}{u(t) - u(t-1)} = constant
 \end{aligned} \tag{2.38}$$



2.3.2 하이브리드 수중글라이더 제어시스템 설계

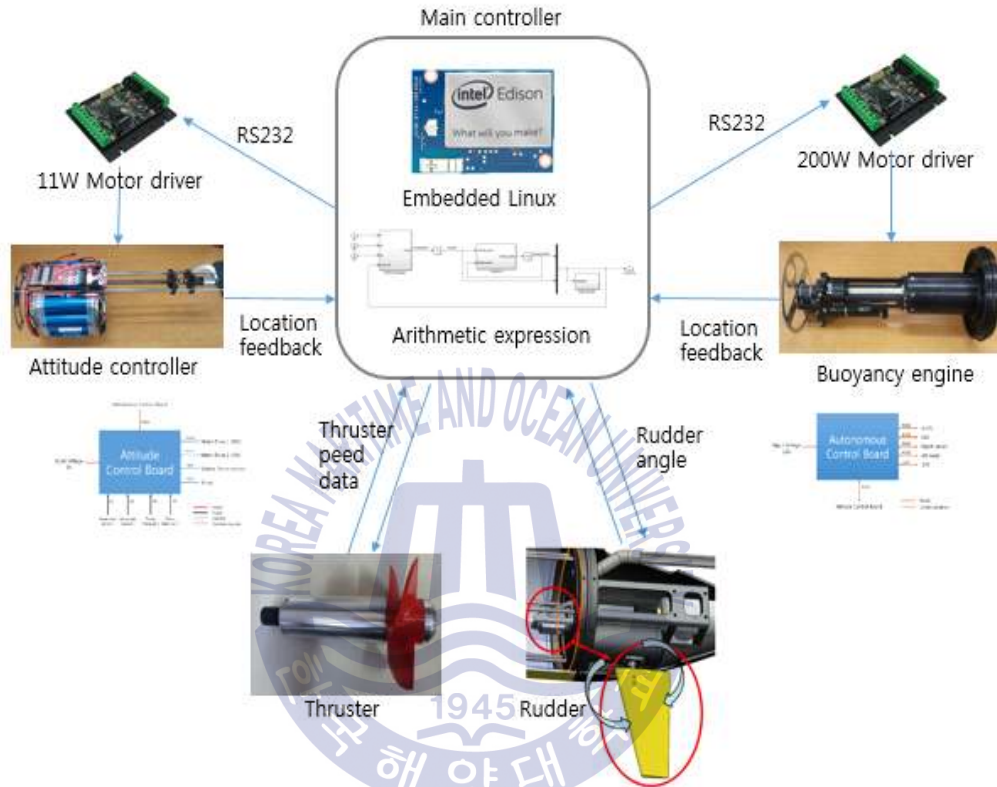


Fig 2.6 Hybrid underwater glider control system design

Fig 2.6의 다이어그램은 하이브리드 수중글라이더의 구동부 제어 시스템을 간단하게 나타낸 그림이다. 주 제어기인 Embedded Linux는 각각의 모터 구동부의 데이터를 피드백 받아 내부에 적용된 산술식에 의해 적절한 데이터를 부력제어기와 자세제어기의 모터 드라이브에 전송하여 하이브리드 수중글라이더의 자세 및 위치를 제어하며 후방 추진체의 속도를 제어한다. 마지막으로 하이브리드 수중글라이더의 방향을 제어하기 위한 러더의 각까지 제어하는 루틴으로 구성되어 있다. (Mark W. Spong, 2006)

2.4 하이브리드 수중글라이더의 시뮬레이션

하이브리드 수중글라이더의 운동을 앞서 나타낸 6자유도 운동방정식의 유효성을 검증하기 위해 MATLAB을 이용한 동역학 시뮬레이터를 Fig. 2.7과 같이 구성하였다.

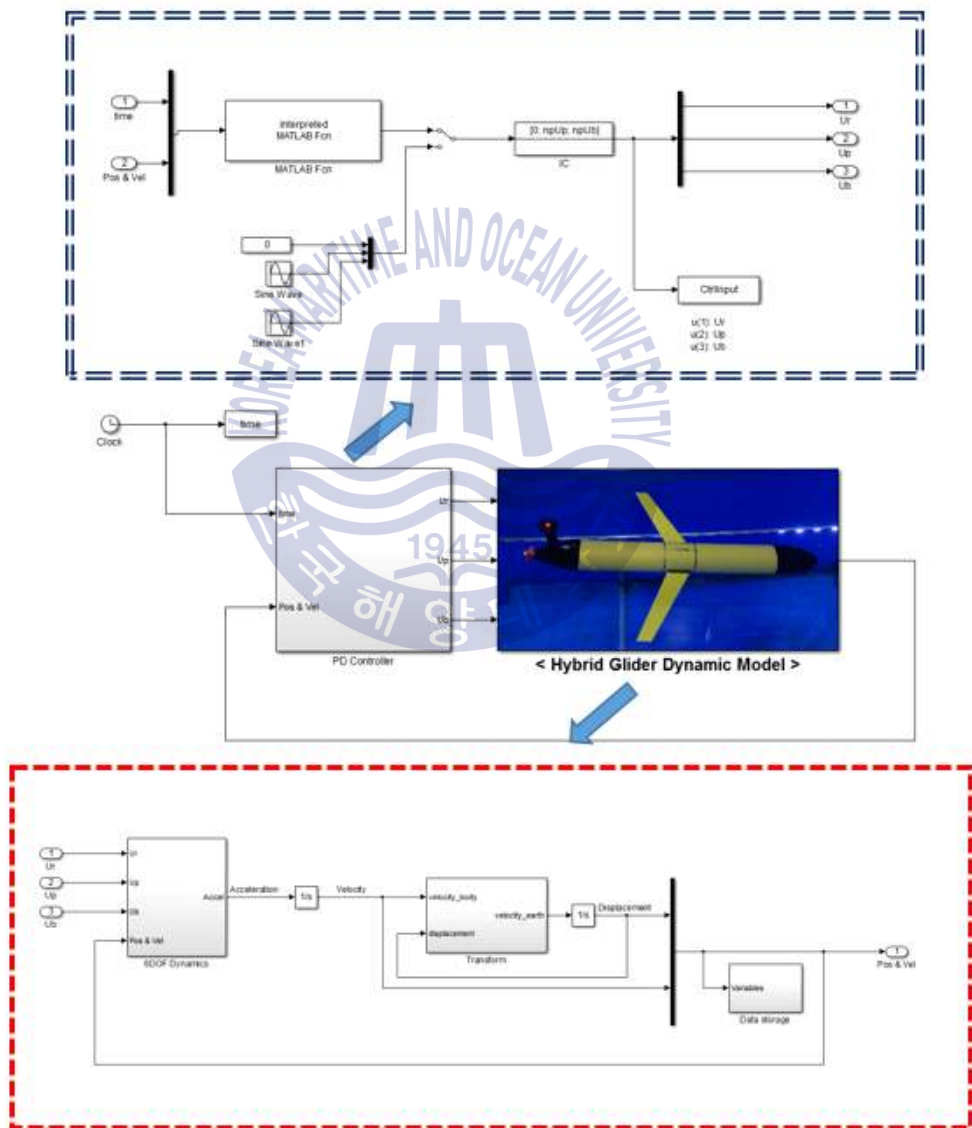


Fig 2.7 Simulator of Hybrid Underwater Glider

2.4.1 운동성능 시뮬레이션

Fig 2.7의 시뮬레이터에서 이중 점선 부분은 글라이더의 운동을 명령하는 부분과 명령에 따라 구동기의 작동을 제어할 수 있는 부분이며 아래 점선은 외력에 따라 하이브리드 수중글라이더의 운동을 계산하는 부분으로 나뉜다.

하이브리드 수중글라이더의 제어 명령에 따른 구동부는 부력, 무게중심, Heading 각 제어, 전방 추력을 제어할 수 있도록 설계되었고, 수중에서 sin wave의 운동을 궤적을 나타내기 위해 제어 알고리즘에 작동한다.

부력제어기의 작동은 목표 수심에 따라 하강 시 해수를 흡입하고 상승 시 토출을 한다. 또한, 하이브리드 수중글라이더의 수평 기동을 위해 부력제어기의 토출량을 제어하여 일정 수심을 유지한다.

자세제어기는 수중글라이더가 활강하는 동안 안정적인 입사각 자세를 유지할 수 있도록 작동한다.

수중에서 하이브리드 수중글라이더가 전진과 방향 전환 시 시뮬레이터 상에서 목표로 하는 수심 및 복표 이동 경로로 기동하기 위해서는 부력제어기의 해수 흡입/토출량과 자세제어기를 통해 안정적인 자세를 유지하여야 하고 방향타를 이용하여 목표 지점까지의 heading 각을 제어해야 하는 복합 제어 시스템을 모사하여야 하고 이를 시뮬레이션을 통해 하이브리드 수중글라이더의 운동성능을 추정하였다. Fig 2.8~Fig 2.11의 그래프는 제어를 수행하지 않고 부력조절장치의 피스톤 이동과 내부이동 질량의 이동으로 글라이더의 수직운동 시뮬레이션을 수행하여 글라이더 운동특성을 분석하였다.(Kan, L, et al., 2008), (Leonard, N.E. et al., 2010), (Mahmoudian, N. and Woolsey, C. 2008)

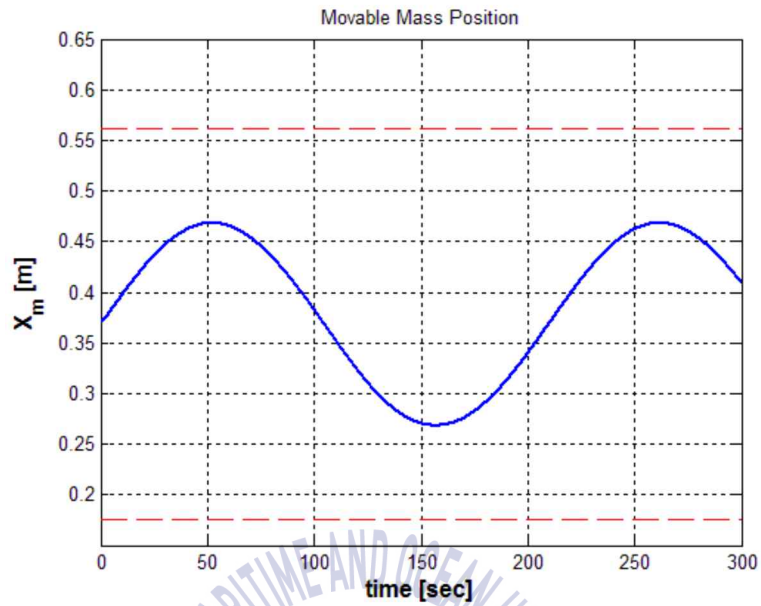


Fig 2.8 Position of internal moving mass

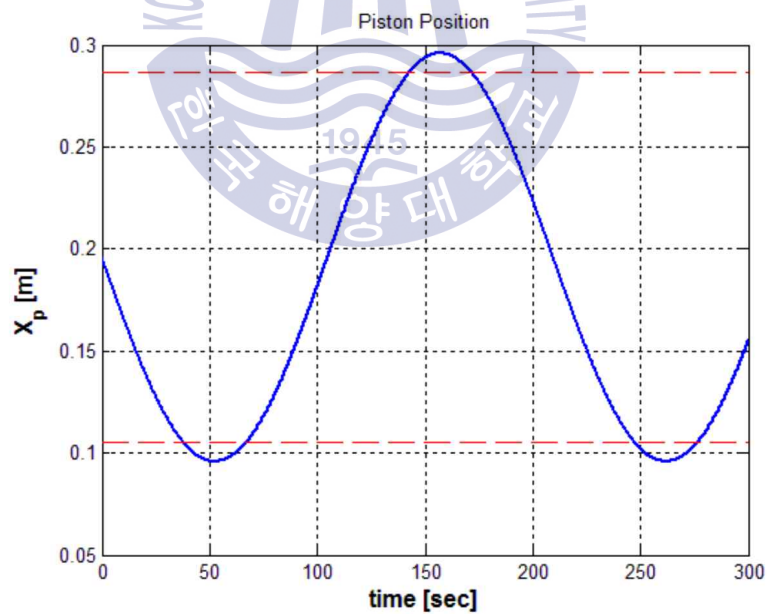


Fig 2.9 Position of buoyancy control piston

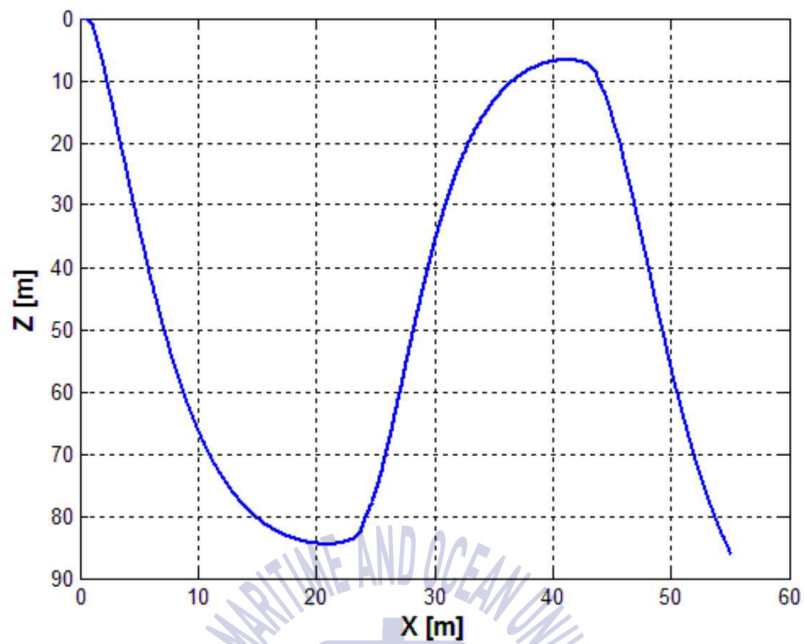


Fig 2.10 Vertical motion locus of hybrid underwater glider

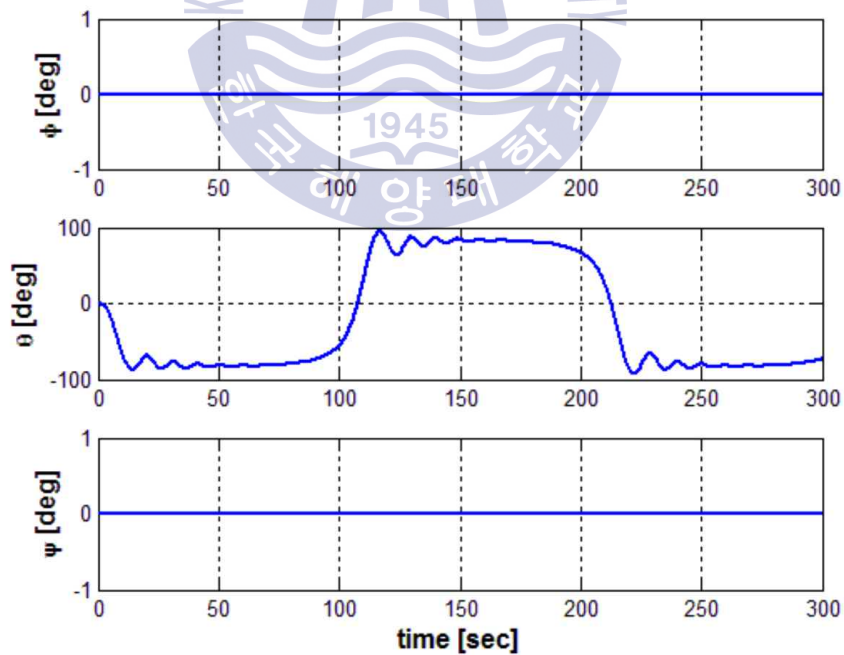


Fig 2.11 Hybrid underwater glider rotation angle

Fig. 2.8~11의 그래프는 하이브리드 수중 글라이더의 피스톤이 글라이더 진행 방향의 반대로 이동하고 내부이동 질량이 글라이더의 진행 방향으로 전진하였을 시 글라이더가 음의 Pitch 각을 갖기 때문에 앞으로 기울게 되며, 이에 의해 발생하는 부력과 체적의 변화에 의해 하강 운동을 하는 것을 볼 수 있으며, 이와는 달리 피스톤이 반대 방향으로 전진하고 내부이동 질량이 진행방향과 반대로 이동하면 글라이더가 양의 Pitch 각을 가지며 상승운동을 하는 것을 볼 수 있다. 또한, 피스톤의 위치와 내부이동 질량이 초기 상태 또는 이동 길이의 중앙에 위치했을 때 Pitch 각이 0° 가 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 피스톤의 위치와 내부이동 질량이 글라이더의 운동에 미치는 상관관계를 확인할 수 있는 시뮬레이션이다.

위 시뮬레이션 결과와 같이 일반적인 부력제어 장치와 내부이동 질량의 변화로는 실제 하이브리드 수중글라이더가 기동하기 위해서는 부족하다.

일반적으로 상용 수중 글라이더의 제어기는 운용효율을 위해 별도의 제어법칙을 적용한 제어시스템을 사용하지 않는다. 오랜 테스트의 데이터를 축적하여 타임 테이블 개념의 제어입력을 정하며 이는 어느 정도의 오차를 인정하는 것이 불필요한 구동부의 움직임에 제한하여 효율적으로 오랜 기간 운용할 수 있기 때문이다. 하지만 본 연구에서는 신경망 자가조정 PID 제어 알고리즘을 적용하여 움직임을 제어 하였는데 이유는 두 가지이다. 연구에 사용된 하이브리드 수중글라이더는 오랜 기간 데이터를 축적할만한 이력을 가질 정도의 테스트 시간이 충분 하지 않았고 다른 이유는 간단하게 연산가능 하며 효율성과 제어라는 두 가지 장점을 적절하게 만족시킬 수 있는 제어기법이다.

먼저 기존의 Gain고정 PID 제어 기법과 본 연구에 적용된 신경망 자가조정 PID 제어 알고리즘의 성능을 분석해 보았다. (Ola Harkegard and S. Torkel Glad, 2005)

시뮬레이션 조건은 하이브리드 수중글라이더를 제어하기 위해 부력제어 장치의 실린더와 자세 제어 장치의 이동 mass를 동시에 제어해야 하며 제어기 성

능을 비교하기 위해 운동모델과 샘플링 타임 그리고 PID Gain을 동일한 값으로 시뮬레이션하였다.(Zhihua Qu, 1998)

2.4.2 하이브리드 수중글라이더의 기초운동 성능 및 시뮬레이션 결과

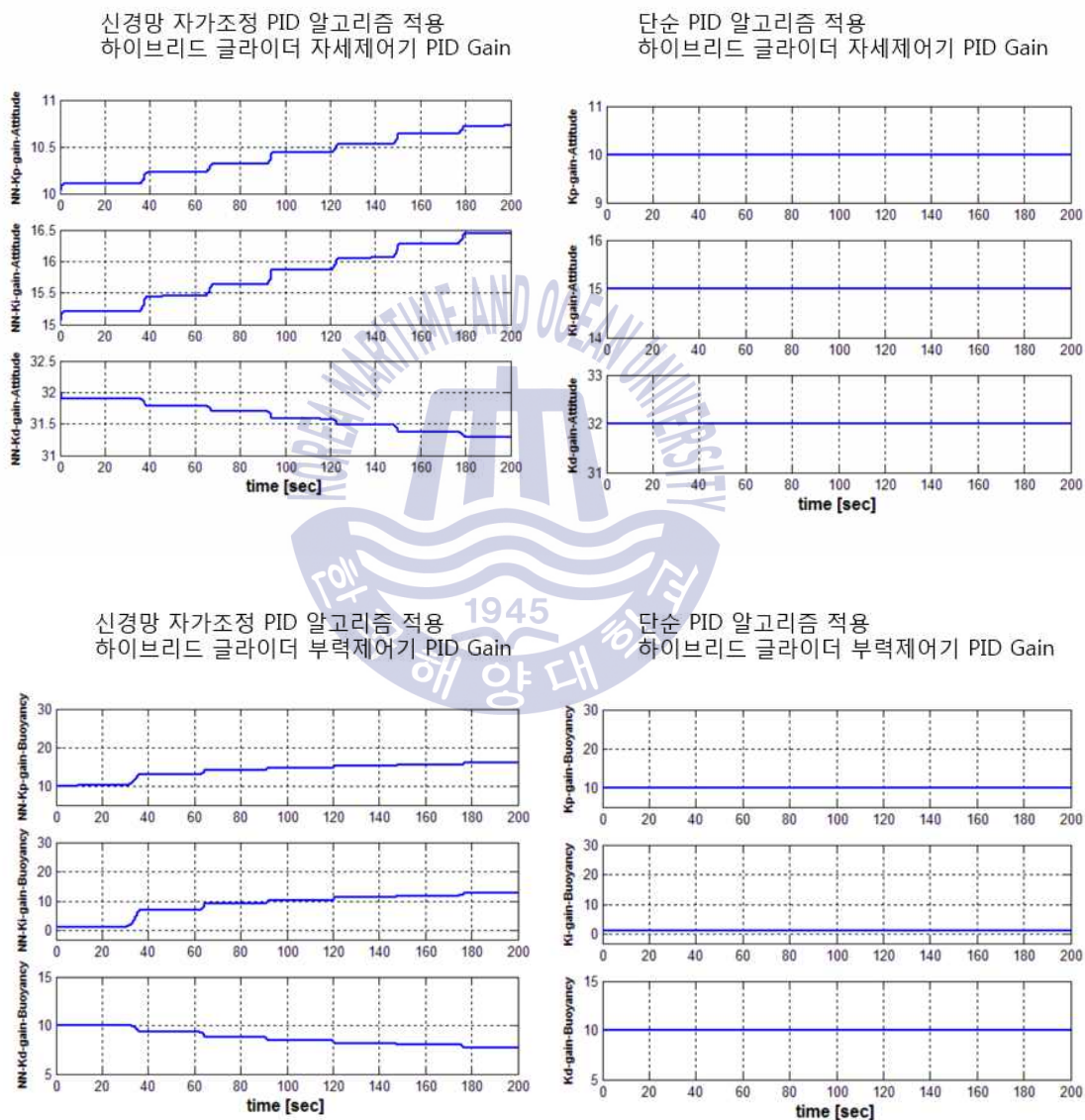


Fig 2.12 Neural network self-tuning PID and simple PID gain

위 그래프는 신경망 자기조정 PID 알고리즘 적용 시 자가 조정되는 PID Gain(좌) 그래프와 단순 PID의 변하지 않는 PID Gain 그래프이다.

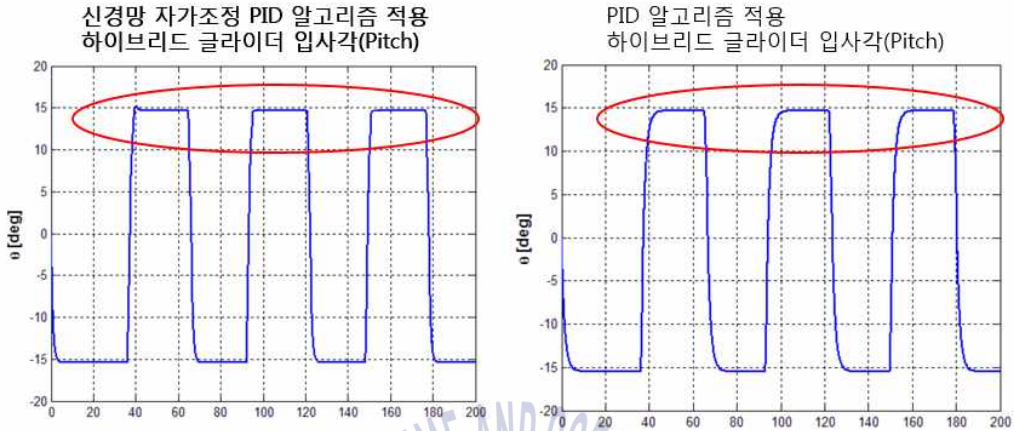


Fig. 2.13 Neural network self-tuning PID and simple PID incident angle

같은 PID Gain으로 제어하여도 신경망 자기조정 PID 알고리즘에 의해 PID Gain이 조정되어 더 정밀한 자세 각이 제어되었다.

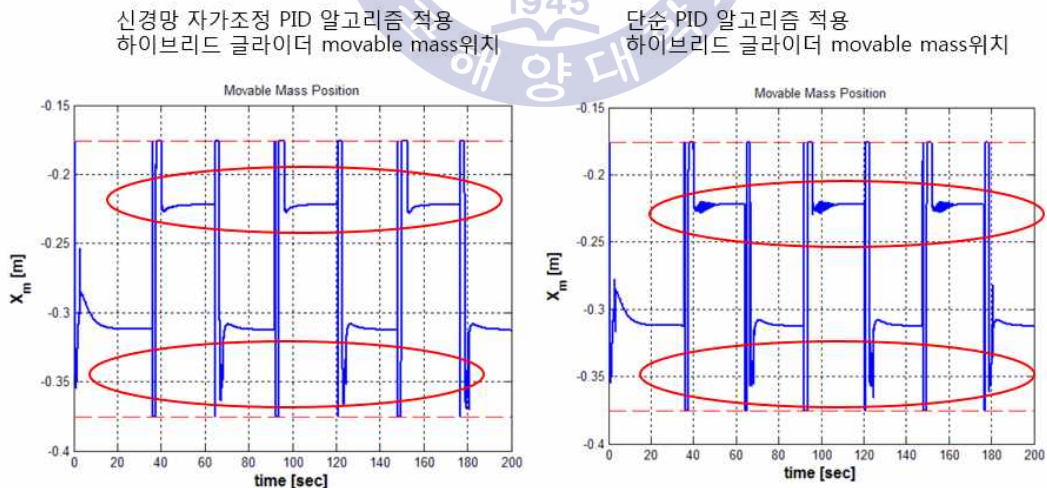


Fig 2.14 The movable mass position of the neural network self-tuning PID and the movable mass position of the simple PID

같은 PID Gain으로 제어하여 신경망 자기조정 PID 알고리즘에 의해 정밀하게 PID Gain이 조정되어 자세 제어기의 movable mass가 불필요하게 이동하지 않아 에너지 효율을 증가 시킬 수 있다. (Rovert. D. Blevins, 1979)

위 설계된 운동 시물레이션과 제어알고리즘을 이용하여 Fig. 2.15~2.22과 같이 수중에서 하이브리드 수중글라이더의 동적거동을 시물레이션하였다.

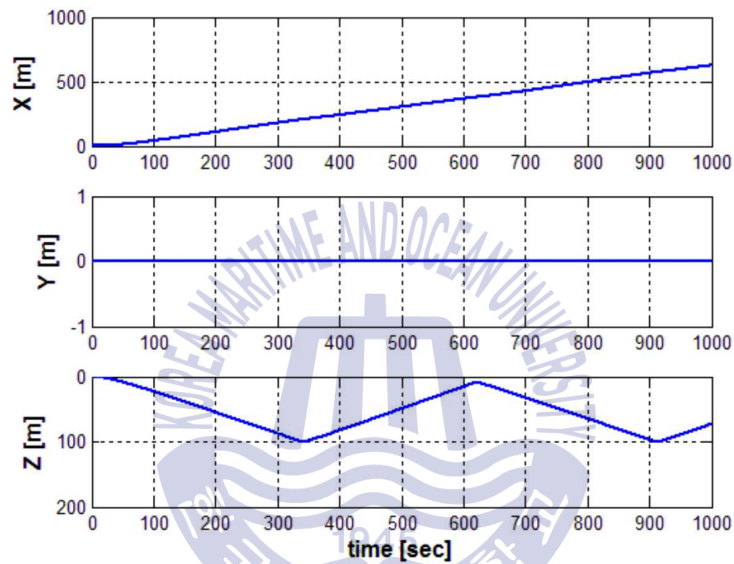


Fig 2.15 Underwater location of hybrid underwater glider

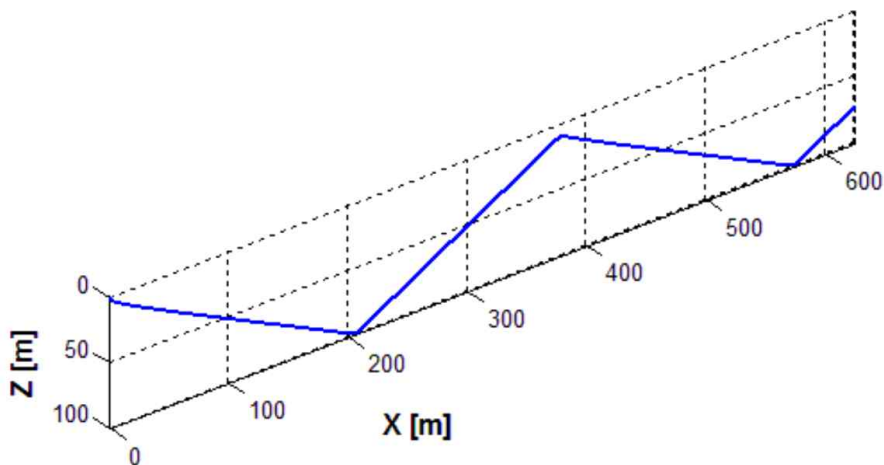


Fig 2.16 Change of position of X, Z of hybrid underwater glider

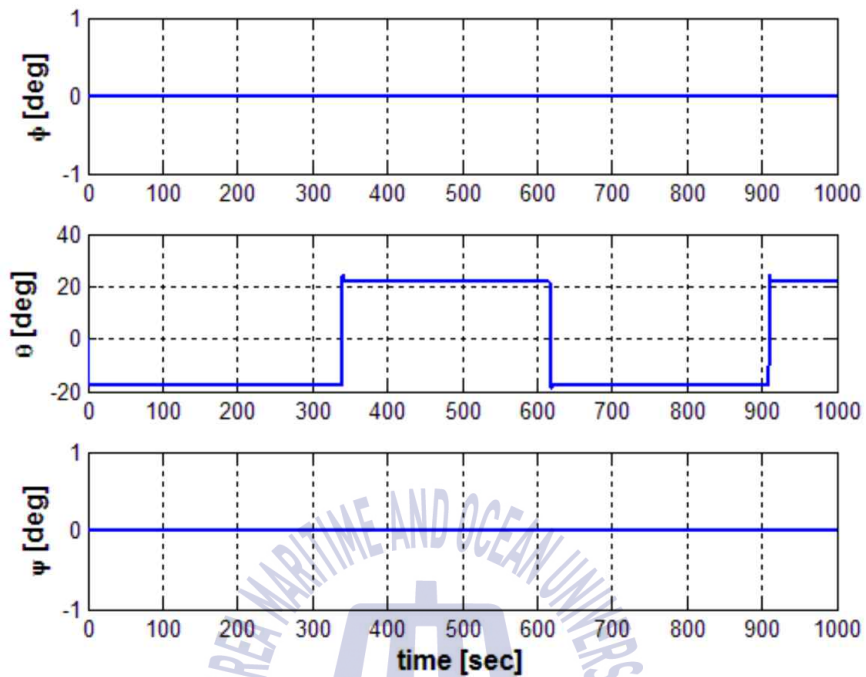


Fig 2.17 Hybrid underwater glider attitude

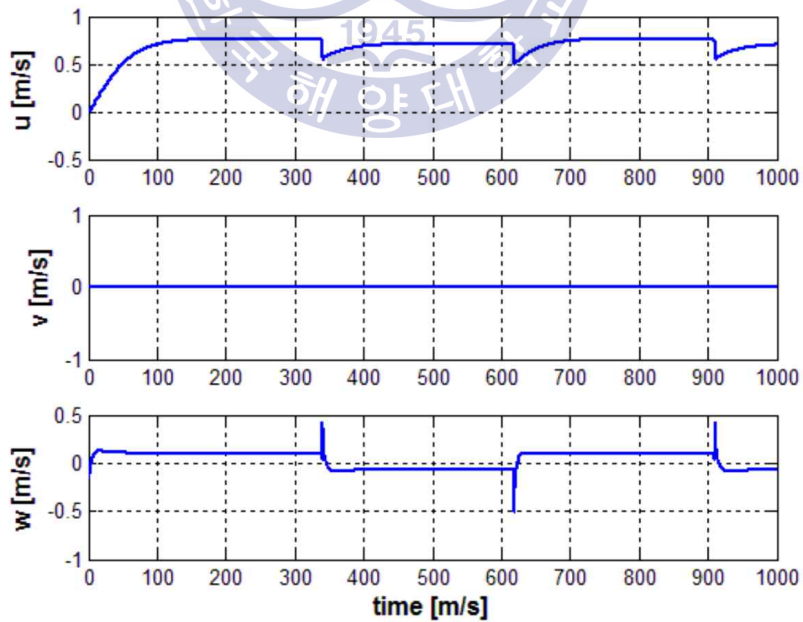


Fig 2.18 Hybrid underwater glider speed

신경망 자가조정 PID 제어 법칙을 적용한 제어입력을 이용하여 글라이더의 Pitch 각 제어와 수심제어를 수행하였다. 수심 제어는 100m에 도달하면 상승, 10m에 도달하면 하강하도록 하였으며, 상승과 하강 시에 Pitch 각도가 -20° , 20° 각도를 가지도록 운동시뮬레이션을 수행하였다. 그래프에서 100m에 도달하기 전 하강 운동 시에는 글라이더의 Pitch 각도는 -20° 가 되는 것을 확인할 수 있으며 100m에 도달한 후 상승 운동 시에는 글라이더의 Pitch 각도는 20° 가 되는 것 확인할 수 있다. 또한 회전 성능을 확인하기 위해 제어법칙을 적용하지 않고 러더의 회전 각도를 10° 로 유지할 때 글라이더의 운동성능을 확인하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다.(Zhang, S., Yu, J., Zhang, A., and Zhang, 2013)

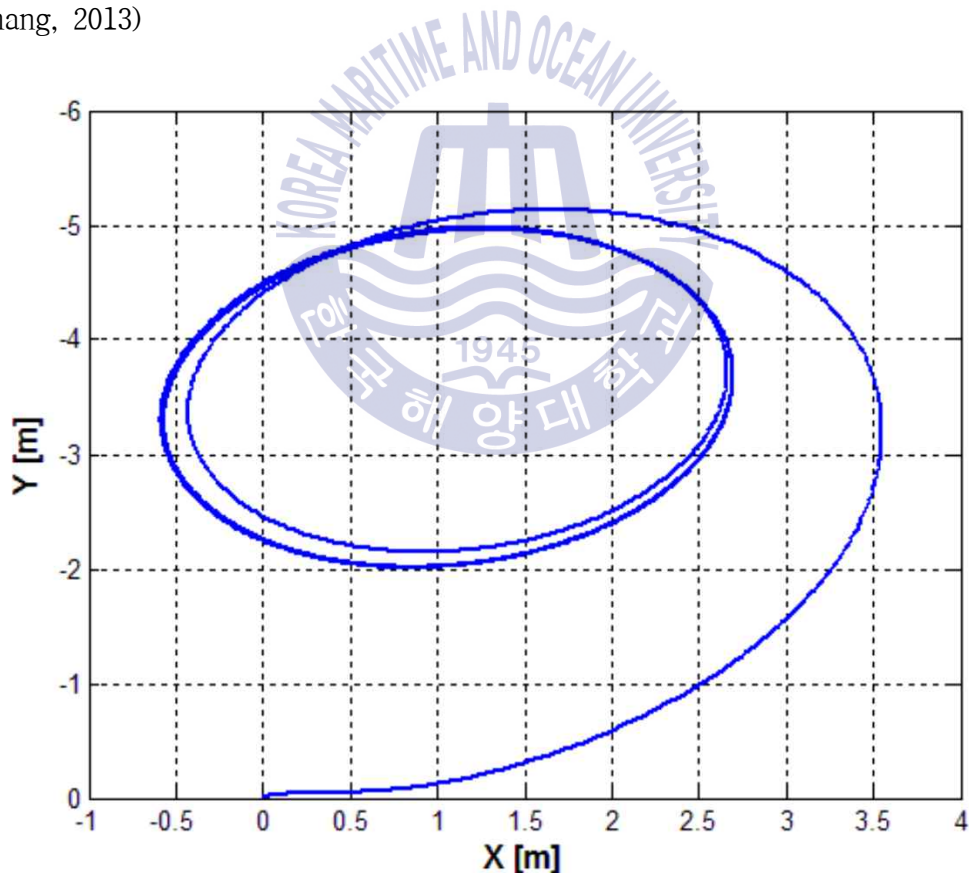


Fig 2.19 Circular motion locus of hybrid underwater glider

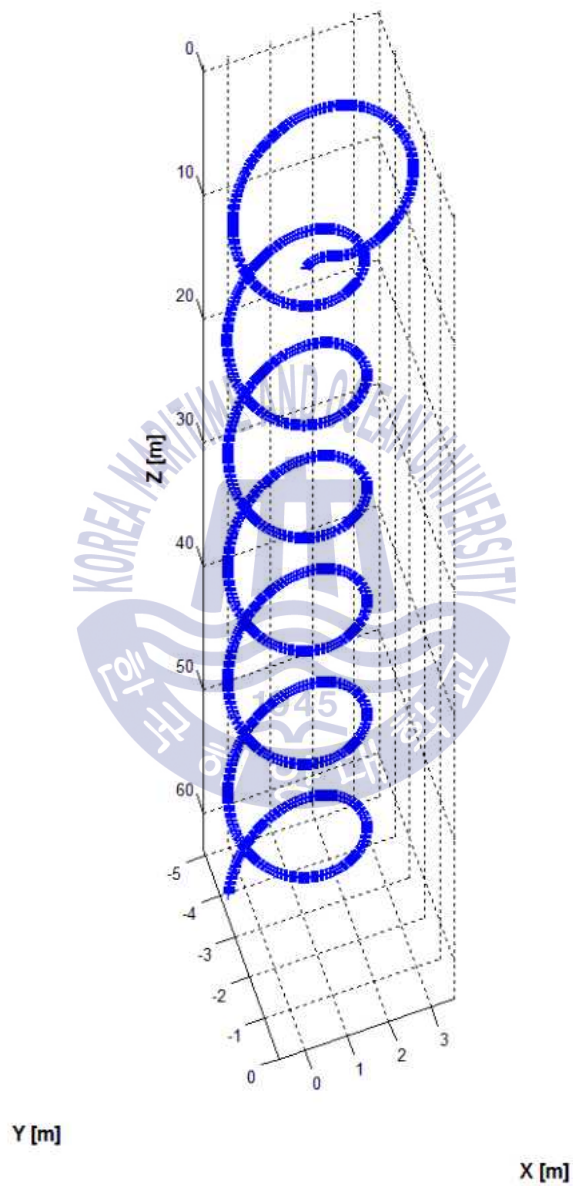


Fig 2.20 Circular Motion Trajectory in Three Dimensions of a Hybrid Underwater Glider

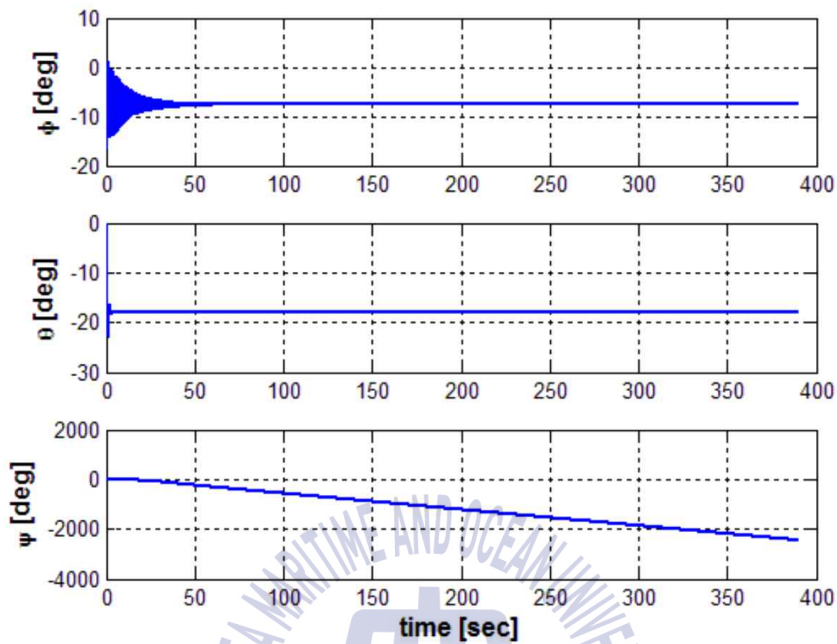


Fig 2.21 Hybrid underwater glider attitude

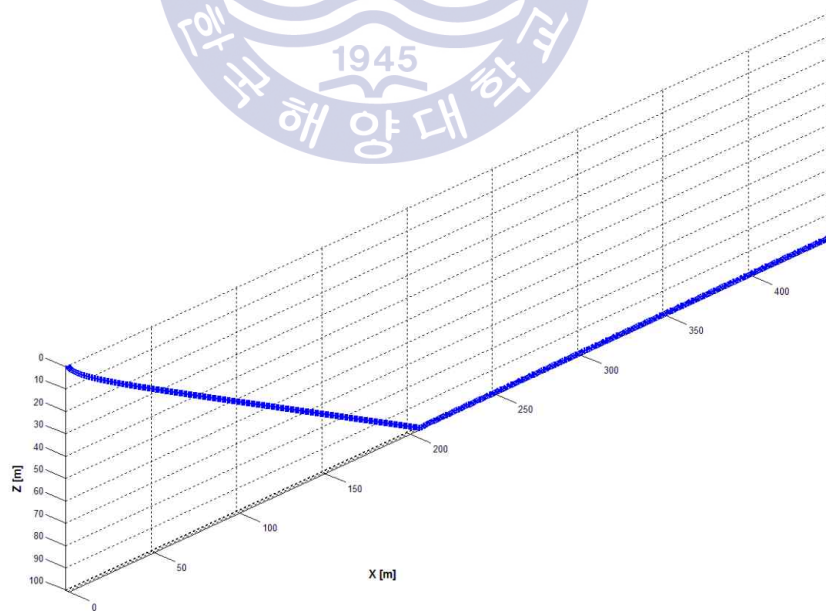


Fig 2.22 Hybrid underwater glider movement using propellant

제 3 장 무인 수상선의 동력학 모델

3.1 무인 수상선의 구조

무인수상선을 포함한 모든 선박은 해상에서 6자유도 운동 방정식을 가지며 병진 운동과 회전운동으로 나타낼 수 있다. 6자유도 방정식의 3성분은 자세에 대한 운동을 나타내고 다른 3가지 성분은 방향에 대한 운동을 나타낸다. Fig 3.1에서와 같이 수상선의 운동에서 자세에 대한 운동은 Surge, Sway, Heave로 정의되고, 방향에 대한 운동은 Roll, Pitch, Yaw에 대한 운동으로 정의된다.(Asgeir J, et al., 2011), (D.F.Myring, 1976.), (Martine A. Abkowitz, 1969)

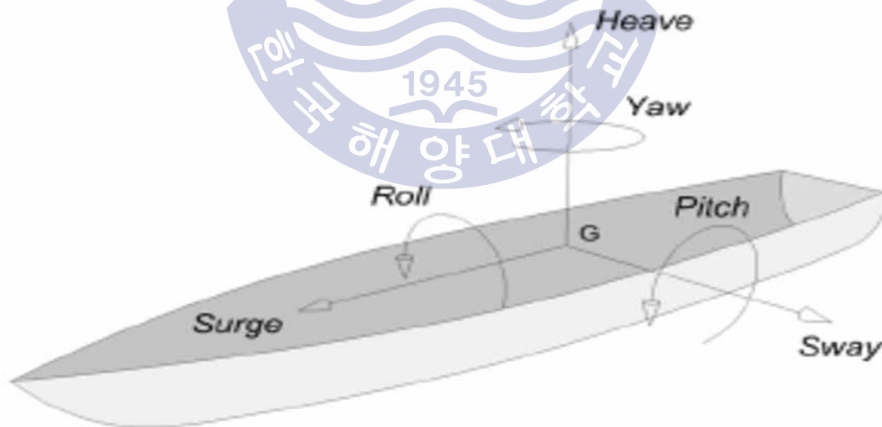


Fig 3.1 6degree of freedom of ship

본 연구에서는 무인수상선의 수상에서의 자세를 관련된 정보인 Roll과 Pitch 그리고 Z방향 성분은 고려하지 않고 3자유도 방정식을 시뮬레이션에 나타내었다.(Christian De Wit, 2009.),

3.2 무인수상선의 동역학

3.2.1 무인수상선의 동역학

x, y, 방향의 위치 및 좌우 방향인 Yaw 정보는 무인수상선의 구동 시스템에 의해 크게 영향을 받는 요소이므로 이는 무인수상선 운동 모델을 사용하여 계산할 수 있다. 무인수상선 구동 시스템에서 입력은 진행 방향에 대한 속도와 방향을 전환하는 회전속도이며 이에 대하여 영향을 받는 출력 요소는 x, y, 위치 및 Yaw 각도이므로 이를 식 3.1과 같은 강체 동역학 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= m(\dot{u} - \nu r - x_g r^2) \\ \dot{Y} &= m(\dot{\nu} - u r - x_g \dot{r}) \\ \dot{N} &= I_z \dot{r} + m x_g (\dot{\nu} + u r) \end{aligned} \quad (3.1)$$

식 3.1에 표현된 동역학을 다시 식 3.2과 같이 벡터-행렬식으로 나타내면 식 3.2와 같이 표현할 수 있다.

$$M_{RB} \dot{\nu} + C_{RB}(\nu) \nu = \tau_{RB} \quad (3.2)$$

여기서 $\nu = [u, \nu, r]^T$ 은 선체 고정 좌표계에서 표현된 무인수상선의 선속도 및 각속도이며, $\tau_{RB} = [X, Y, N]^T$ 는 선체 고정 좌표계에서 외부로부터 작용하는 힘과 모멘트 즉 외력을 나타낸다.

식 2.36에서 행렬 M_{RB} 와 C_{RB} 는 강체의 관성행렬과 코리올리 행렬이며 식 3.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{BR} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & m x_g \\ 0 & m x_g & I_z \end{bmatrix}, \quad C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + \nu) \\ 0 & 0 & m u \\ m(x_g r + \nu) - m u & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

위 식에서 I 는 표시된 축의 질량관성 모멘트이다. 또한 선체고정 좌표계에서 무인수상선의 중심축은 $y_g = 0$ 이고 선체의 균일 분포된 질량에 따른 관성모멘트 $I_{xy} = I_{yz} = 0$ 이다. 그리고 무인수상선의 속도는 식 3.4과 표현할 수 있다.

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u_0 \quad (3.4)$$

마지막으로 강체 운동방정식의 Yaw 방향의 수평 모션 파라미터는 식 3.5와 같다.

$$J(\eta) \equiv R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.2.2 유체력

- 관성유체력 부가질량(Added mass and inertia)

수상에서 무인수상선이 가속도를 가지고 수평면을 이동할 때 영향을 받는 정도를 부가질량에 의한 유체력이라 하며, PMM(Planar Motion Mechanism)과 같은 실험적인 방법이나 이론적인 방법으로 도출할 수 있다. 부가 질량에 대한 유체력의 크기는 가속도에 비례한다. 일반적인 선박에 관해 관성유체력과 부가질량은 식 3.6로 표현할 수 있다.

$$M_{add} = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -Y_r - N_r \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

식 3.6에 표현한 X_u 등의 유체력 계수들은 파도의 영향을 받는 선박이기 때문에 파도에 의한 외부힘에 관하여 나타내어야 하지만 본 연구에서는 무인수상선의 파도에 의한 외란은 상수로 취급한다. 또한 관성 유체력은 식 3.7과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{Add}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_\nu \nu + Y_r r \\ 0 & 0 & -X_u u \\ Y_\nu \nu - Y_r r & X_u u & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

-점성 유체감쇠력 (Hydrodynamic damping)

수상에서 임의의 속도로 운동하는 물체의 경우 유체와의 상대적 속도로 인해 점성에 의한 유체감쇠력이 발생한다. 유체에 의한 감쇠는 고속으로 운항 시 비선형적 특징을 가지며 각 항에 연성 되어 복잡한 특성을 나타낸다. 하지만 실험적, 경험적 데이터의 부족과 계측의 어려움으로 비선형 연성 관계를 가지는 점성유체 감쇠력을 구하는 것은 매우 까다롭다. 따라서 2차항 이상의 고차 항은 영향이 적다는 가정에 따라 2차 이상의 성분은 무시하였다. 이러한 가정을 바탕으로 식 2.42와 같이 선형 점성유체 감쇠 행렬을 표현하였다.

여기서 선형점성유체감쇠력이 비선형감쇠 유체력 보다 매우 크다. 이유는 고속으로 운항하지 않는 저속의 무인수상선이기 때문이다.

따라서 $D(\nu) = [D + D_n(\nu)] \approx D$ 라 가정하면 점성유체 감쇠력은 식 3.8과 같이 단순하게 표현 할 수 있다.

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_\nu & -Y_r \\ 0 & -N_\nu & -N_r \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

위 식에서 D 는 선형 점성유체감쇠력행렬을 나타내는 벡터-행렬식 이다.

무인수상선은 수상에서 운동하는 운동체로 수중 운동체와는 다르게 유체에 의한 외부 힘 보다는 외부 Thrust force에 의해 더 큰 영향을 받는다. 이러한 특징을 시뮬레이션에 반영하기 위해 추진력과 모멘트에 관한 식을 식 3.9~3.10에 정리 하였다.

$$\begin{aligned}
F_x &= (T_1 + T_2)(1 - t_p) = (\rho n_1^2 D_p^4 K_T + \rho n_2^2 D_p^4 K_T)(1 - 0.6) \\
&= 0.4 \rho D_p^4 K_T (n_1^2 + n_2^2) \\
F_y &= T_3(1 - t_p) = (\rho n_3^2 D_p^4 K_T)(1 - 0.6) \\
&= 0.4 \rho n_3^2 D_p^4 K_T
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$F_z = 0$$

모멘트는

$$\begin{aligned}
Nx &= T_3(1 - t_p) \times d = 0.4 \rho n_3^2 D_p^4 K_T \times d \\
Ny &= (T_1 + T_2)(1 - t_p) \times d = 0.4 \rho D_p^4 K_T (n_1^2 + n_2^2) \\
Nz &= (T_1 - T_2)(1 - t_p) \frac{RB}{2} + T_3(1 - t_p) \frac{RL}{2} \\
&= \rho D_p^4 K_T (n_1^2 - n_2^2) + 3 \rho n_3^2 D_p^4 K_T
\end{aligned} \tag{3.10}$$

위 수식은 일반적인 선박에 관한 3자유도 방정식으로 일반 선박은 뒤쪽 방향타를 이용하여 진행 방향을 변경하는 것과 다르게 본 논문의 무인수상선은 앞쪽에 Heading 방향을 제어할 수 있는 횡 방향의 추진체가 설치되어 있어 방향타를 사용하지 않고 따라서 방향에 관련된 조건은 힘으로 나타낼 수 있다. 따라서 위 운동 방정식은 타당하며 위 운동방정식에 사용된 계수들을 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Parameters of propellers

Parameters of propellers	
Water density	$\rho = 1031 (kg/m^3)$
Propeller diameter	$D_p = 0.2m$
thrust coefficient	$K_T = 0.4$
thrust deduction coefficient	$t_p = 0.6$
Water draft of 무인수상선	$d = 0.5m$
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	$T_3 = \rho n_3^2 D_p^4 K_T$

3.2.3 유체력을 포함한 무인수상선 3자유도 운동방정식

앞에서 고려된 각각의 계수들을 외력성분으로 대입하면 아래 식 3.11~ 3.13과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr - \sin\theta + F_x + N_x \quad (3.11)$$

$$Y = Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + \cos\theta\sin\phi + F_y + N_y \quad (3.12)$$

$$N = N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi + \sin\theta + N_z \quad (3.13)$$

위 식은 무인수상선에 작용하는 3자유도 유체력을 나타낸 것이며, 선형 감쇠, 부가질량 항의 유체력 계수를 나타낸다.

3.3 무인 수상선의 운동성능 시뮬레이션

3.3.1 무인수상선의 기초운동성능 및 제어성능 시뮬레이션

무인 수상선은 후방 추진체 2기와 전방 횡 방향의 추진체로 구성되어있다. 후방 추진체를 이용하여 전진 추력을 얻고 전방 횡 방향의 추진체를 이용하여 Heading Angle을 제어한다. 무인 수상선은 전방 추진을 위한 추진체의 추력을 제어하여 전진속도를 제어하며 횡 방향의 추진체의 추력을 제어하여 Heading Angle을 제어하며 이를 제어하기 위해 PID 제어를 설계하였다. PID 제어 알고리즘을 무인 수상선에 적용한 이유는 본 논문의 협력항법(leader-follower 항법)의 leader 역할을 하는 무인 수상선의 움직임을 실제에 근접하게 제어하는 것이 좋으나 본 연구의 주 관심은 하이브리드 수중글라이더의 항법과 협력항법의 구현 및 성능 검증이 목적이므로 leader 역할의 무인 수상선은 동작을 간단하게 묘사하여 하이브리드 수중글라이더의 협력항법을 위한 보조 운동체로 활용하기 위해 단순하게 설계하였다

$$u_{position} = K_p \cdot e_{position} + K_i \cdot \int e_{position} dt + K_d \cdot \dot{e}_{position} \quad (3.14)$$

$$u_{\psi} = K_p \cdot e_{\psi} + K_i \cdot \int e_{\psi} dt + K_d \cdot \dot{e}_{\psi} \quad (3.15)$$

위 유체력을 포함한 동역학 식과 식 3.14~3.15를 이용하여 Fig 3.2의 무인수상선의 운동 시뮬레이션을 설계하였다.

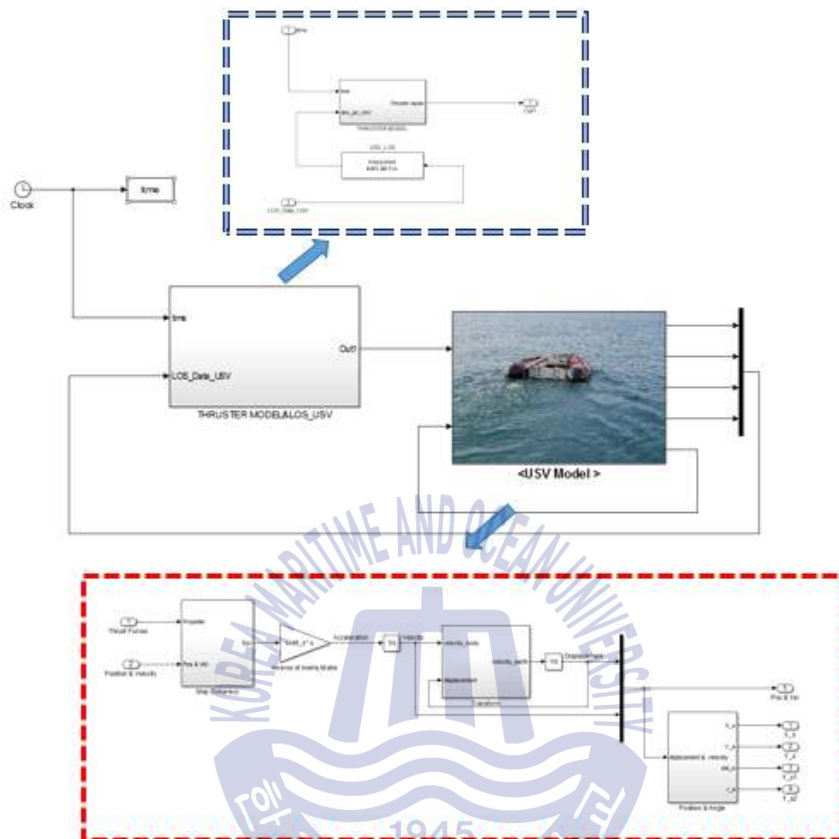


Fig 3.2 Simulator of Unmanned Surface Vehicle

3.3.2 무인 수상선의 동력학 시뮬레이션 결과

Fig 3.2의 Matlab/Simulink 무인수상선의 시뮬레이터는 무인수상선의 성능을 확인하기 위한 시뮬레이터로 전방 횡측으로 설치된 추진체 1개와 후방에 위치한 전진 방향의 추진체 2개로 구성되어있고 전방 추진체를 이용하여 진행방향을 제어한다.

-무인수상선의 기초운동 성능 및 제어성능 시뮬레이션 결과

위 시뮬레이터를 기반으로 무인 수상선(무인수상선)의 운동특성을 파악하였다.

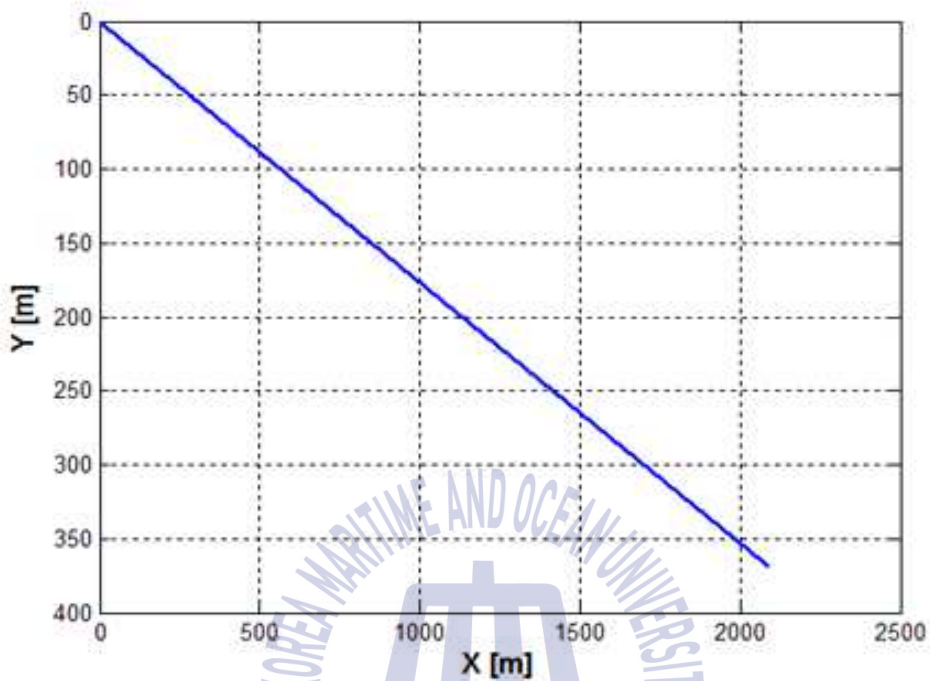


Fig 3.3 Unmanned Surface Vehicle linear start result

Fig 3.3은 후방 전진 방향에 사용되는 2개의 추진체를 이용하여 직선 주행 시 물레이션 결과를 그래프로 나타내었다. 시물레이션 조건은 Table 6과 같다.

Table 6 Simulation condition

무인수상선 is going straightly	
Propeller	RPS = 3 (round per second)
Heading Angle	angle = 0 (degrees)

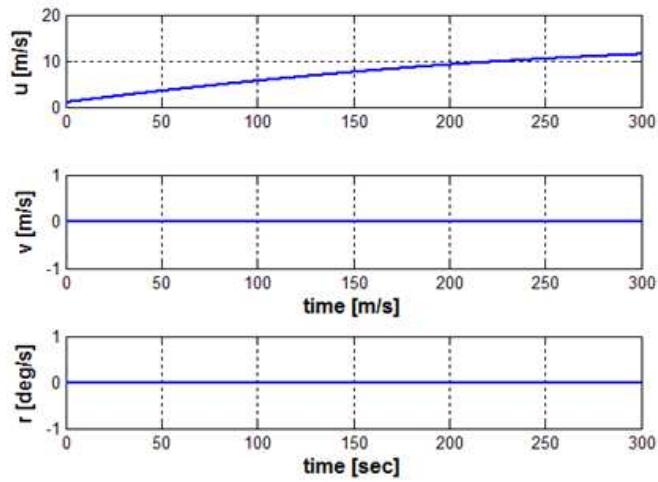


Fig. 3.4 Cruising speed of Unmanned Surface Vehicle

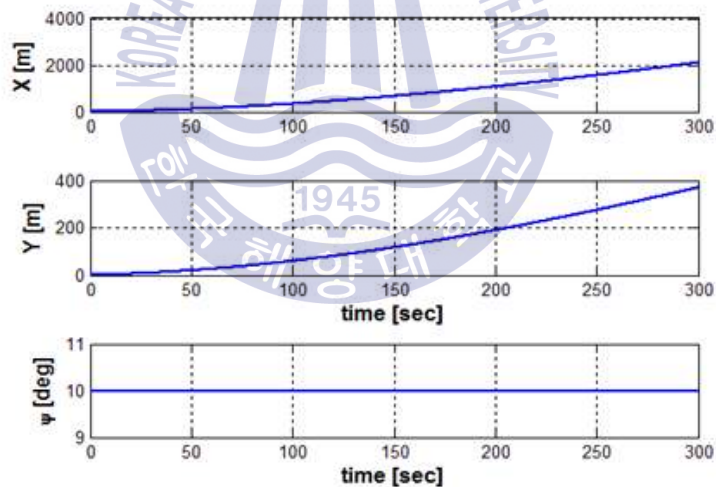


Fig 3.5 Unmanned Surface Vehicle motion trajectory in straight running

Fig 3.4~3.5의 그래프는 직선 운동성능 시뮬레이션의 결과로 직선 주행 시 무인수상선의 동체 이동속도 및 수평면에서의 이동궤적을 나타낸 결과이다.

시뮬레이션 결과 무인수상선의 이동궤적과 이동거리 그리고 동체의 속도를 바

탕으로 직선 주행의 운동성능을 잘 모사하였다.

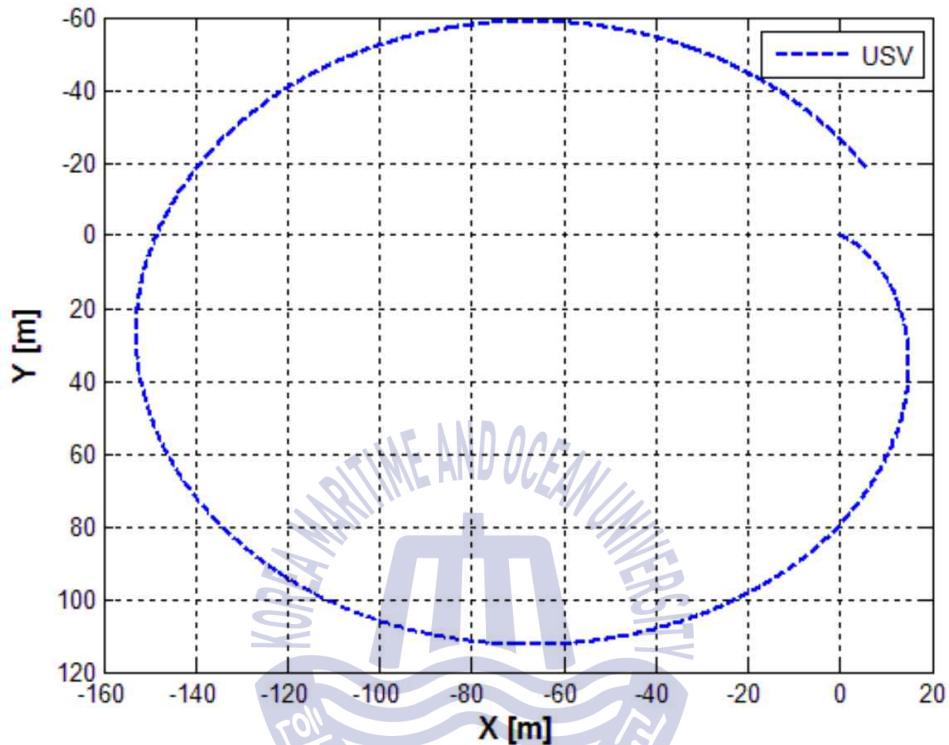


Fig 3.6 Trajectory in the horizontal plane of the Unmanned Surface Vehicle during circular driving

Fig 3.6은 수평면에서의 무인수상선의 궤적으로 전방 횡 방향으로 설치된 추진체를 제어하여 무인수상선의 Heading Angle을 변화시켜 회전 성능을 확인하였다. 회전성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 Table 7과 같다.

Table 7 Simulation condition

무인수상선 is going straightly	
Propeller	RPS = 3 (round per second)
Heading Angle	angle = 20 (degrees)

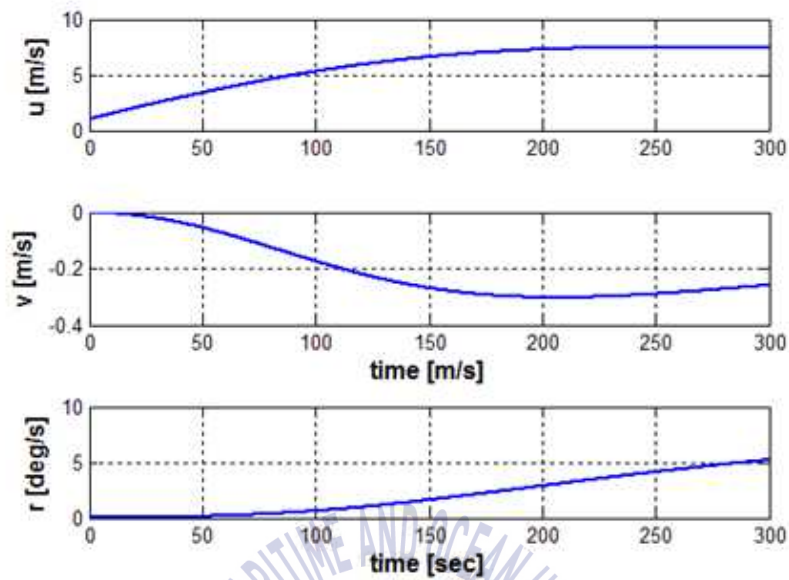


Fig. 3.7 Speed of Unmanned Surface Vehicle in circular driving

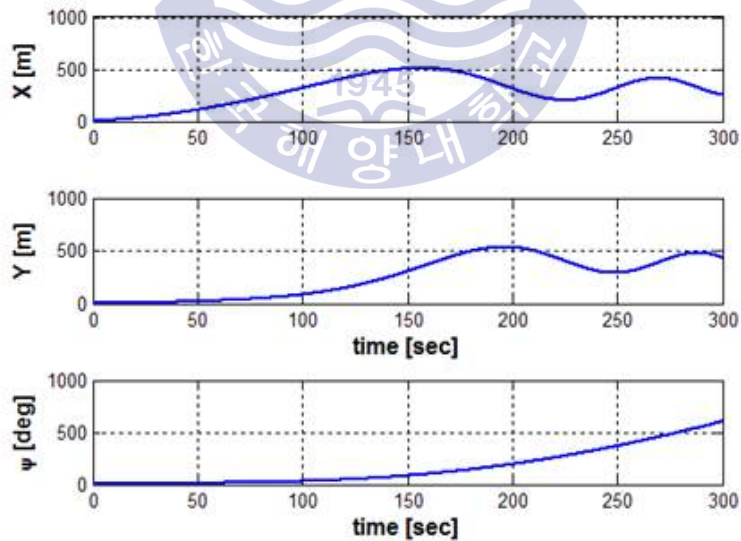


Fig 3.8 Movement trajectory of Unmanned Surface Vehicle during circular driving

Fig 3.8~3.9의 그래프는 회전 운동성능 시뮬레이션의 결과로 회전 주행 시 무인수상선의 동체 이동속도 및 수평면에서의 이동궤적을 나타낸 결과이다.

시뮬레이션 결과 무인수상선의 회전 시 이동궤적과 이동 거리 그리고 동체의 속도를 바탕으로 직선 주행의 운동성능 및 회전 운동성능을 잘 모사하였고 시뮬레이션으로 모사한 무인수상선의 데이터를 기반으로 무인수상선의 항법을 설계하였다.



제4장 하이브리드 수중글라이더와 무인수상선 시스템 구성

본 장에서는 위 시뮬레이터를 바탕으로 하이브리드 수중글라이더를 설계하였다. Fig 4.1은 하이브리드 수중글라이더의 외형으로 수심 200m를 기준으로 설계하였다. 외형은 전형적인 토피도(Torpedo) 선형을 가지며, 총 길이는 1,970mm로 설계되었다.

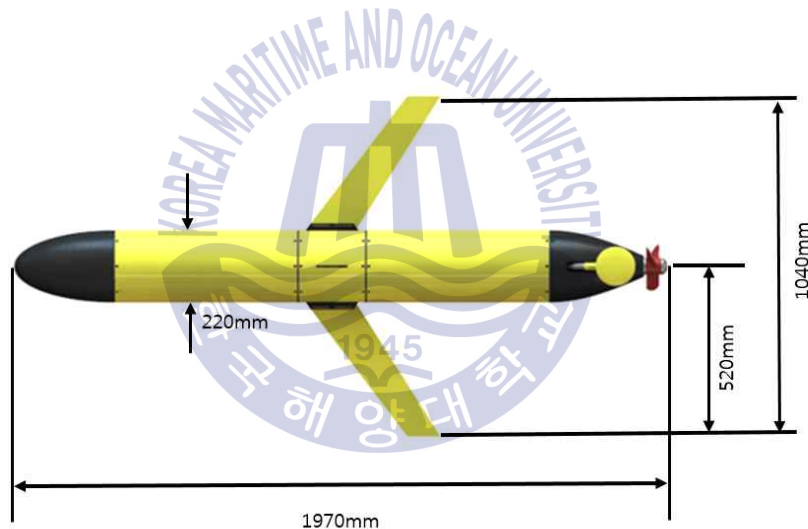


Fig 4.1 The appearance of hybrid underwater glider

양쪽 주날개의 외곽 끝점 간의 길이는 1,040m, 러더 끝점에서 안테나 끝점 간의 길이는 580mm, 하이브리드 수중글라이더의 총 중량은 약 50.5kgf, 부력량은 약 50.6kgf로 설계하여, 약 0.1kgf의 양성 부력을 가지고 있으며 선미 중앙에는 추진기가 장착되어 있다.

하이브리드 수중글라이더의 길이정보는 Table 8과 같다.

Table 8 Dimensions of hybrid underwater glider

Index	Value
Length	1.97(m)
Diameter	0.22(m)
Width	1.04(m)
Height	0.58(m)
Weight	50.50(kgf)
Buoyancy	50.60(kgf)

4.1 하이브리드 수중 글라이더 제어시스템 구성

4.1.1 제어시스템 구성

-제어 및 운동시스템 구성

하이브리드 수중글라이더의 글라이딩과 추진체를 사용하여 경로 및 속도를 제어하고 원하는 동작을 수행할 수 있도록 하이브리드 수중글라이더의 제어시스템의 하드웨어를 구성하였다. 하이브리드 수중글라이더의 제어 요소는 부력 엔진 부력 제어량, 피치각도 조절을 위한 배터리 위치, 러더의 각도 제어이다. 이들 중에서 부력엔진 부력 제어량, Pitch 각도 조절용 배터리 위치는 주로 하강 시작 시와 상승 시작 시에만 제어하도록 하여 전력 소모량을 최소화한다. 주행 중 미리 설정된 임계점, 혹은 위험 요소에 다다랐을 경우 제어하도록 한다. 수직러더의 경우 주행 중 계속적으로 PID 제어 기법을 통해 수중 글라이더의 방향을 제어한다. 구성도는 Fig 4.2와 같다.

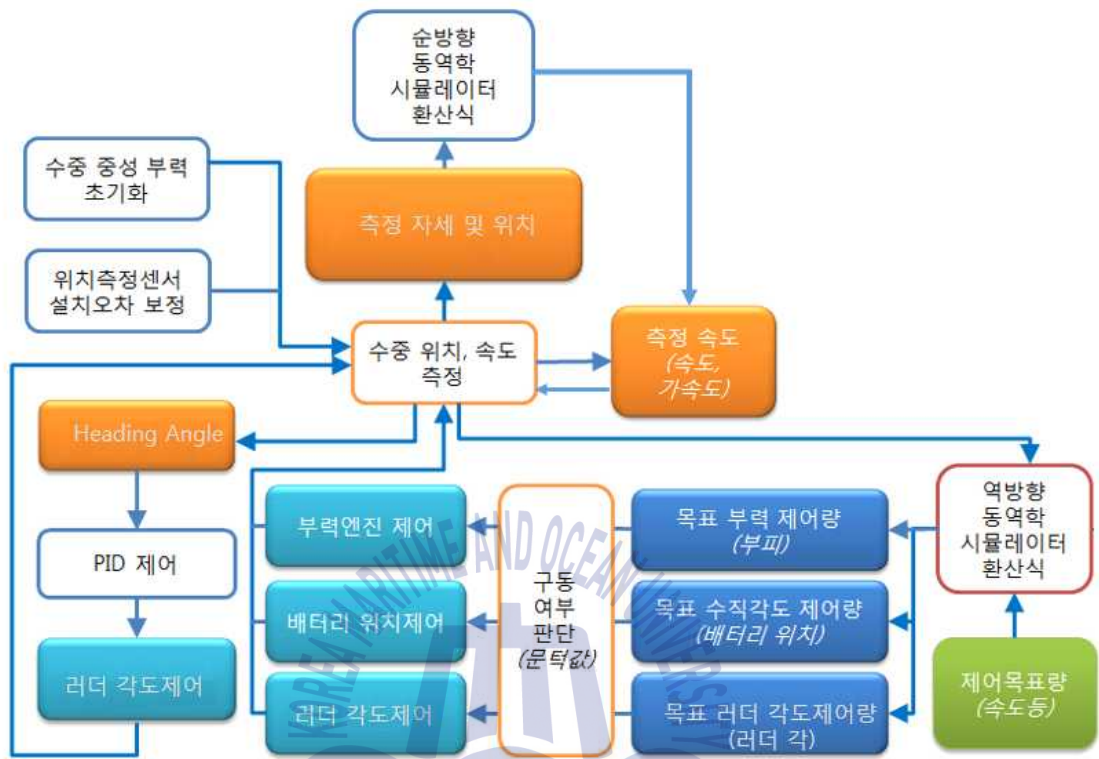


Fig 4.2 Hybrid underwater glider main drive control structure

하이브리드 수중글라이더 제어시스템을 설계하기 위해서는 기본이 되는 전원 관리 시스템이 필요하다.

배터리는 1차 전지(Primary Battery)와 충전을 할 수 있는 2차 전지(Secondary Battery)로 나뉜다. 1차 전지 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 전지 타입은 알카라인 배터리와 리튬 전지이며 일반적으로 리튬전지가 알카라인에 비해서 3배의 용량을 가진다. 2차전지는 리튬이온전지, 리튬 폴리머 전지, 니켈수소전지, 연납 축전지 등이 있으며 AUV 용으로는 리튬폴리머 전지가 가장 많이 사용된다. AUV는 상대적으로 1주일 이하의 단기간 동작하기 때문에 충전 가능한 2차 전지를 이용하는 경향이 많고, 수중 글라이더는 한 달 이상의 장거리, 장기간을 동작하기 때문에 1차 전지를 사용하여 수행 기간을 최대화하여 사용하는 것이 일반적

이다. 하지만 본 연구에 사용된 배터리는 테스트용으로 제작되어 2차 전지인 리튬 인산 철 배터리(Li-Fe)를 사용하였다. 리튬인산철 배터리는 리튬폴리머와 비교하면 에너지 집진율이 조금 떨어지지만 비교적 저가이며 리튬폴리머나 1차전지에 비해 안전성이 높아 테스트 장비에 작용하기 적합하다. 이를 이용하여 전원 시스템은 Fig 4.3과 같이 구성하였다.

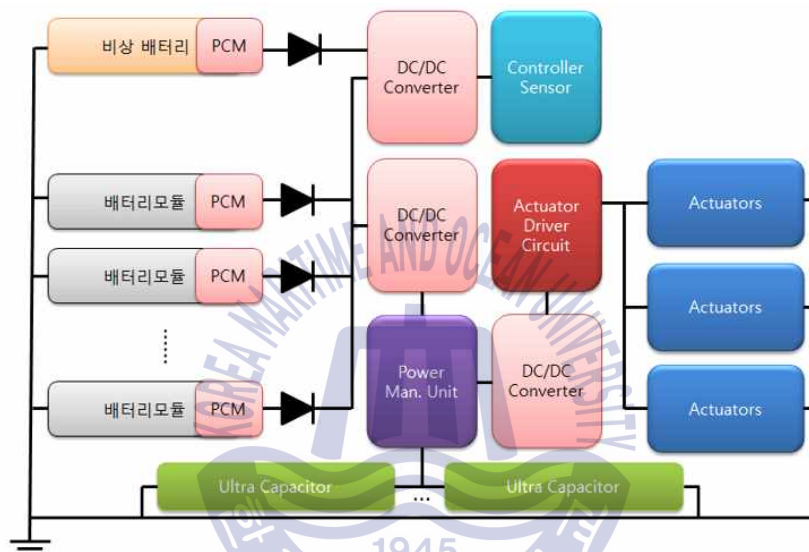


Fig 4.3 Power System Architecture

-기구부 구성

설계된 하이브리드 수중글라이더는 전방 선체 부, 페이로드 적재 부, 후방 선체 부의 총 3개의 부분으로 구성되며, 이들 각 부분은 방수 및 내압 구조를 가지고 추후 페이로드 적재에 따라 유동적인 구조 변경이 가능하도록 설계되었다.

Fig. 3.25에는 하이브리드 수중글라이더의 3D 모델링 선체 단면도로 내부형상을 설명하였다.

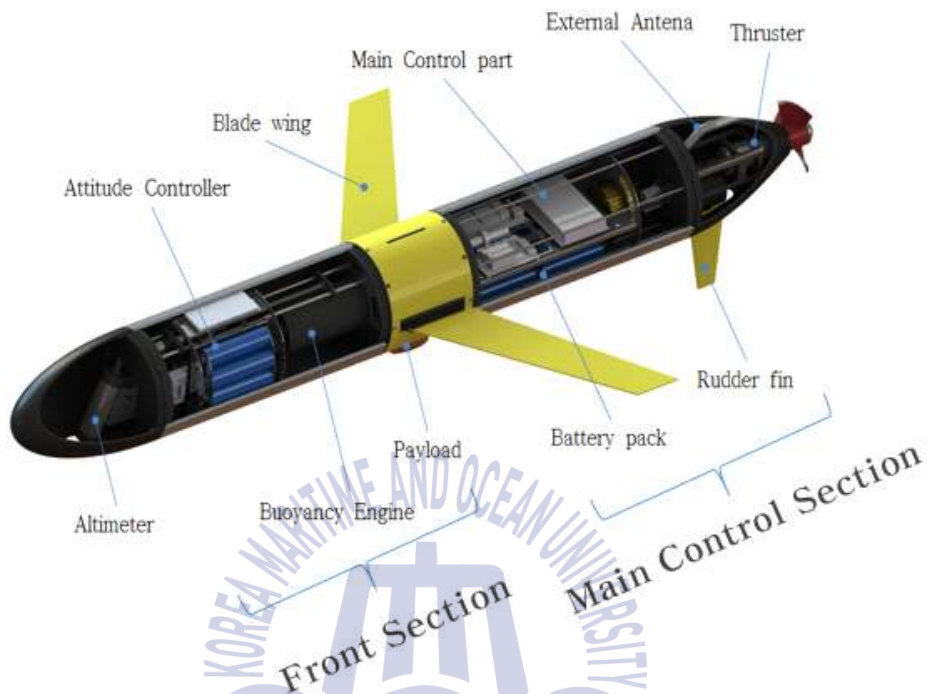


Fig. 4.4 Cross section of a hybrid underwater glider

Fig. 4.4는 선수부, 동체 부 및 선미부로 구성되고 선수 방향에 부력엔진과 자세제어기, 선미 방향에는 자율제어 보드 및 기타 내장품을 탑재하였으며, 동체 부 가운데에는 추가 탑재 공간(Payload)가 위치한다. 노즈콘과 카울링 안쪽(Wet area)에는 해수가 유입되는 구조를 가진다. 카울링의 상단에는 통신을 위한 안테나, 하단에는 선수동요 각을 제어하기 위한 러더, 후면에는 자체적인 추진을 위한 추진기로 구성된다.

수중 글라이더가 수중에서 수직 주행 즉, 상/하향 활강할 수 있는 에너지는 중력과 부력의 차이로 발생한다. 따라서 일정한 체적을 유지한 부력상태에서는 임의의 질량체를 추가하여 중력의 영향을 크게 만들어서 가라앉을 수 있고, 해당

질량을 제거하였을 때는 상대적인 부력의 증가로 다시 수면으로 떠 오르게 된다.

본 하이브리드 수중글라이더에서는 Fig. 4.5와 같이 피스톤으로 내부 체적을 확보하는 실린더방식을 채택하였고, 피스톤 작동에는 리니어 모션 시스템을 적용하여 정밀한 부력제어가 가능하도록 하였다.



Fig 4.5 Buoyancy engine

부력 제어기의 역할은 선체가 아래쪽으로 활강 시 중력보다 상대적으로 부력을 감소시켜 음의 부력으로 동체를 변화시키며, 반대로 위쪽으로 활강 시에는 중력보다 부력을 증가시켜 동체를 양의 부력으로 변화시킨다.

수중 글라이더는 내부의 질량을 이동시켜서 자세를 제어할 수 있고 최적의 활강 경로 조정과 수중에서의 자세 안정화를 위해서는 추가적인 자유도를 제어할 구동기가 필요하다. 따라서 별도의 자세를 제어해 줄 구조물이 필요하며 이와 같

은 역할을 하는 것이 자세 제어기이며 이를 Fig. 4.6에 나타냈다.

자세제어기는 부력제어기와 같은 공간을 점유하게 설계하여 효율적으로 공간배치를 하였고 동체의 공간 활용을 위해 이동 질량의 형상을 호(Arc)형대로 설계하여 이동 질량이 움직일 때 부력제어기와의 간섭이 일어나지 않게 설계하였다.

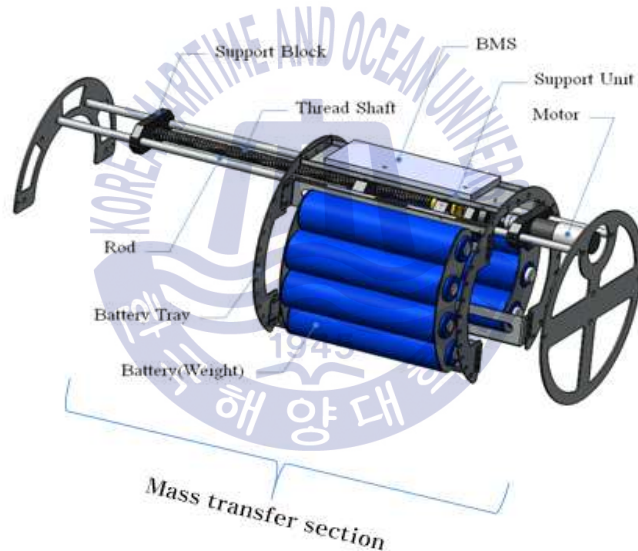
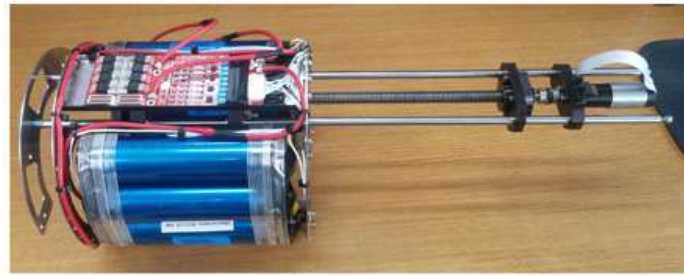


Fig 4.6 Attitude Controller

자세제어기의 구동원리는 무게이동에 의한 부력중심과 질량중심을 변화시켜 동체전체의 평형 상태가 변화하게 된다. 무게 추가 좌표계에서 양의 방향으로 이동하면 선체는 앞쪽으로 기울고, 음의 방향으로 이동하면 동체가 뒤로 기울게 된다.

마지막으로 하이브리드 수중글라이더의 복합 추진 방식을 적용하기 위해 추진

기 장착 및 러더를 장착할 수 있는 구조를 설계하였고 Fig. 4.7에 나타내었다.

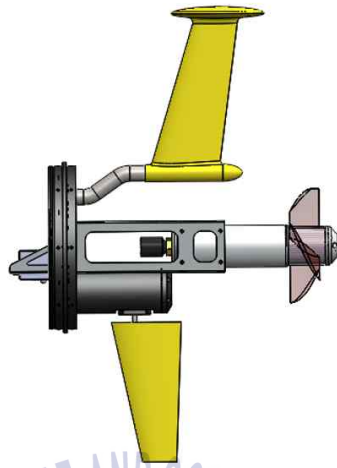


Fig 4.7 Thruster and Rudder

설치된 추진기는 프로펠러 타입의 추진 방식을 사용하였고 모터드라이브가 내장된 구조이다. PWM 신호를 제어 명령으로 전진 방향 추력을 발생한다.

수중 글라이더에서 선수동요 각을 제어하는 방식은 러더를 사용하는 방식과 선체 내부에 무게 질량을 회전하는 기구를 설치하여 제어하는 방식이 있다. 하지만 하이브리드 수중글라이더는 러더를 사용하여 Heading 각을 제어하는 방식을 채택하여 설계하였다. 하이브리드 수중글라이더는 임무 수행 중 상황에 따라 AUV와 같이 직선 및 회전 주행조건을 충족시키기 위해 러더를 도입하였다.

-하이브리드 수중 글라이더 설계 성능검증

설계된 하이브리드 수중글라이더의 운동성능을 알아보기 위해 수조에서 기초 운동성능 테스트를 Fig 4.8과 같이 실시하였다.

수조에서의 운동 성능 테스트의 목적은 부력제어 장치 및 자세 제어 장치의 구동 상태를 테스트하였고 시험조건은 3m × 4m 크기의 외란이 없는 실내수조

에 담수를 받아 진행하였다.

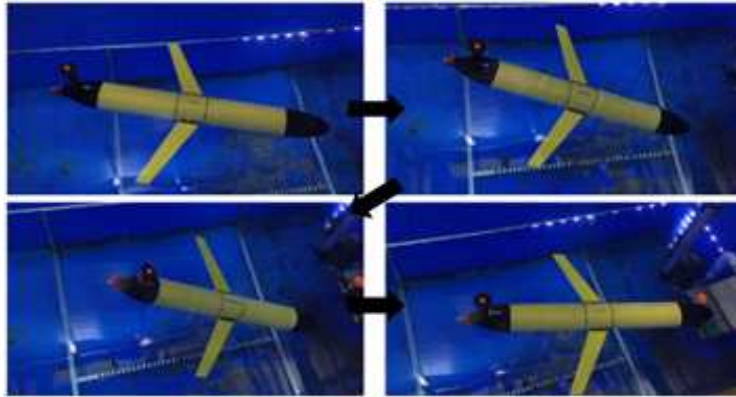


Fig 4.8 Basic drive test

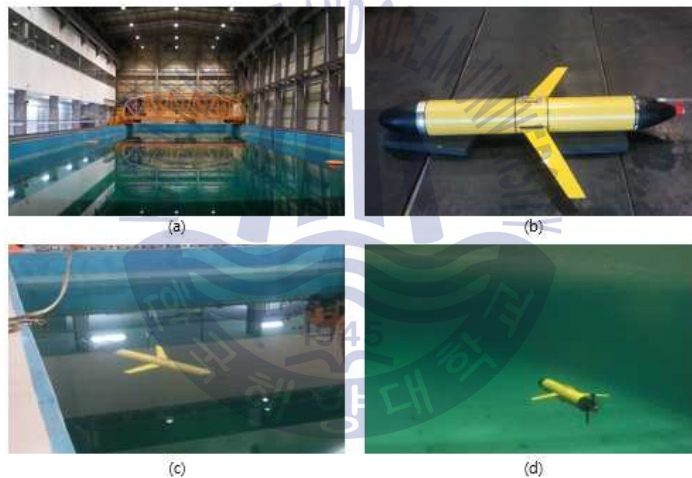


Fig 4.9 Steering performance test

Fig 4.9(a)는 국립해양조사원 수조 동에서 조종성능 실험을 수행하였다. 테스트 환경은 길이 50m, 너비 15m, 깊이 5~10m이다. Fig 4.9(b)는 조립된 상태를 보여주고 있으며 Fig 4.9(c)과 같이 수조의 시작 부분에 투하하였다. Fig 4.9(d)는 수평주행테스트를 실시하였다.

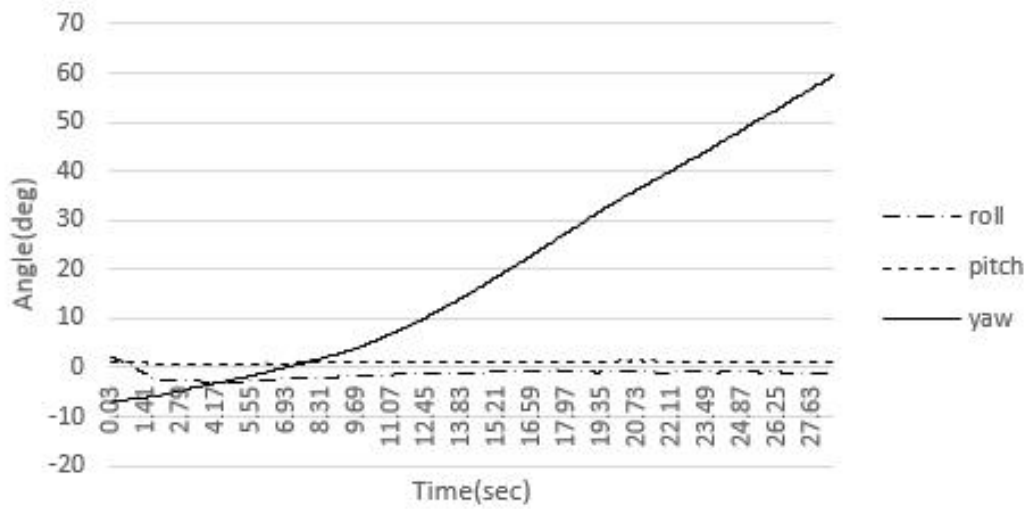


Fig 4.10 Maneuvering results using rudder

조종성의 테스트로 얻어진 결과는 Fig. 4.10과 같다. 추진기에 의해 최대속도에 도달하기까지 타력의 부족으로 상대적으로 적은 Heading Angle의 변화를 보였으나, 10초 이후 일정 속도 이후에는 Heading Angle이 증가하였다.

4.1.2 센서시스템 구성

- ARS(Attitude Reference System)

목표한 점으로 이동하기 위해 필수적으로 필요한 요소인 Heading Angle은 관성 센서에서 출력되는 각속도를 적분하여 사용한다. 수중에서 자신의 진행 방향과 위치를 정확히 계측하는 것은 에너지 소비를 줄이는 기술이며 수중에서 자신의 위치와 진행 방향을 정확히 계측할 수 있다면 주행 중 수상으로 자주 부상할 필요가 없어 에너지 소모를 크게 줄일 수 있다.

또한, 하이브리드 수중글라이더는 수상에서 GPS를 이용하여 현재의 위치를 측정하고 다음 목표 위치로 진행하기 위해 LOS(line-of-sight) 방식을 사용하여 자신이 가고자 하는 방향의 Heading 각을 계산한다. 수중글라이더가 수중으로 잠수하게 되면 자신의 위치는 위에서 설계한 6자유도 운동방정식을 기반으로 계산하여 다음 위치 까지 sin wave를 그리며 전진한다, 따라서 하이브리드 수중글라이더에서 가장 중요한 항법 정보는 Heading 각이다.

ARS는 자이로 센서와 가속도센서, 지자기 센서를 융합하여 각도를 추정할 때, 흔히 공간상의 3개 자세인 Roll, Pitch, Yaw를 측정하는 장치이다.(S.G. Garg, L. D. Morrow and R. Mamen, 2008)

RLG(Ring laser gyroscope)를 이용한 ARS는 일반적으로 시간 증가에 따른 데이터의 적분 오차 누적(적분 오차) 문제를 가지고 있다. 이러한 적분 오차의 누적을 줄이기 위해서 본 논문에서는 확장 칼만 필터를 이용하여 자이로 데이터, 가속도 데이터 그리고 지자기 데이터를 모두 활용한다. 확장 칼만 필터를 이용하여 센서 데이터들의 적분 오차 누적을 보정하는 구도를 Fig 4. 8과 같이 나타내었다.(H. U. Park, J. S. Jeong, 2013)

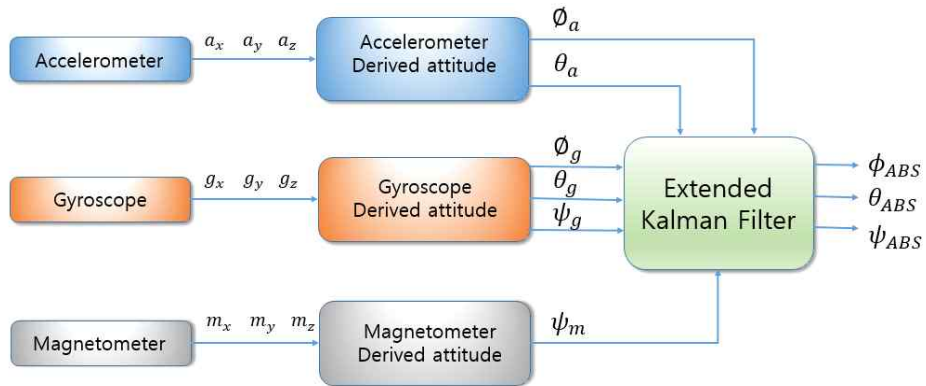


Fig 4.11 Structure of ARS algorithm

Fig 4.11은 RLG의 각속도를 오일러 각과 각속도 사이의 관계식을 이용하여 적분하고 적분된 Roll, Pitch, Yaw의 데이터를 확장 칼만 필터를 이용하여 가속도 및 외부 지자기 데이터를 이용하여 보정하는 방법이다. 위 방식에서 지자기 센서는 자력 환경에 매우 취약하므로 초기 Yaw 각 정보를 제공하는 센서로 사용하고 RLG 센서를 기반으로 하는 ARS를 구성하고 센서 데이터들을 확장 칼만 필터로 처리하는 시스템을 설계하였다. 이를 위해 확장 칼만 필터 알고리즘을 다음과 같이 구성하였다. 본 시스템에서 확장 칼만 필터의 상태변수는 $x = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ 로 나타내었다. 그리고 시스템 모델은 자이로 가속도와 오일러 각 사이의 관계식을 식 4.1과 같이 나타내었다.(J. N. Lim, et al., 2013)

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + w \quad (4.1)$$

$$= \begin{bmatrix} p + q \sin\phi \tan\theta + r \cos\phi \tan\theta \\ q \cos\phi - r \sin\phi \\ q \sin\phi \sec\theta + r \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} + w \equiv f(x) + w$$

위 식에서 비선형함수인 $f(x)$ 는 칼만 필터에 적용할 수 없으므로 식 3.1의 $f(x)$ 를 각각의 상태변수에 대해 편미분 하여 자코비안을 식 4.2과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} & \frac{\partial f_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} & \frac{\partial f_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \phi} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta} & \frac{\partial f_3}{\partial \psi} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} q \cos \phi \tan \theta - r \sin \phi \tan \theta & q \sin \phi \sec \theta^2 - r \cos \phi \sec \theta^2 & 0 \\ -q \sin \phi - r \cos \phi & 0 & 0 \\ q \cos \phi \sec \theta - r \sin \phi \sec \theta & q \sin \phi \sec \theta \tan \theta + r \cos \phi \sec \theta \tan \theta & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

칼만 필터는 이산시간에 대한 알고리즘이다. 따라서 식 4.2를 이산화 하면 시스템 행렬 A 는 식 4.3과 같다.

$$A = I + dt * A \tag{4.3}$$

Fig. 4.3에서 dt 는 샘플시간이며 I 는 항등행렬(Identity matrix)이다. 보정 값인 가속도 및 지자기 데이터는 식 4.4와 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} fx \\ fy \\ fz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \cos \theta \sin \phi \\ -g \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

여기서 $\phi = \sin^{-1} \left(\frac{-fy}{g \cos \theta} \right)$, $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{fx}{g} \right)$, $\psi = mag_k$

$$mag_k = mag_k - mag_1 \tag{4.5}$$

식 4.4에서 ϕ, θ 는 가속도에서 근사적으로 계산하였고 실제 위와 같은 방법으로 계산한 ϕ, θ 는 오차가 크다. 또한, 지자기 데이터(Mag)를 이용하여 보정데이터 ψ 를 구하는데 사용된 Fig. 4.5의 의미는 측정된 지자기 데이터에서 처음 측정된 데이터를 빼주면 지자기 데이터의 각도의 변화량만을 구할 수 있다. 지자기 데이터의 각도 변화량을 이용하여 RLG의 적분 오차를 포함한 데이터 ψ 를 보정한다.

다음으로 측정 모델식(z)는 보정용 측정값이 가속도데이터와 지자기 데이터로

부터 식 3.7과 같이 계산되어 상태변수 3가지를 모두 측정 할 수 있다.

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} + v = Hx + v \quad (4.6)$$

식 4.6은 측정값이 있는 선형식으로 자코비안을 구하지 않아도 된다.

마지막으로 시스템 잡음 공분산과 측정 잡음 공분산인 Q, R 행렬은 신호특성 및 RLG의 특성을 정확하게 계측할 수 있는 장비가 있어야 실제에 가깝게 계측할 수 있지만 계측 장비가 상당한 고가이기 때문에 Q, R 행렬을 설계 인자로 보고 성능의 추이를 관찰하며 결정하였다.

식 4.1~4.6을 통해 확장 칼만 필터에 사용될 시스템 설계 및 행렬을 모두 구하였고 이를 칼만 필터의 계산 순서에 적용하여 Fig. 4.9과 같은 순서로 계산을 수행하면 된다.

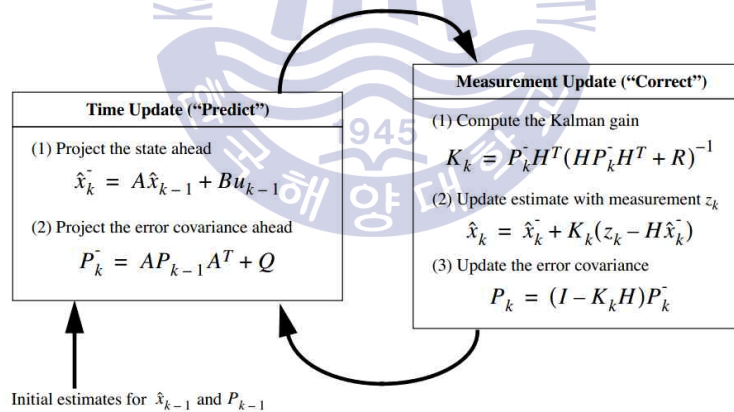


Fig 4.12 Kalman filter calculation procedure

Fig 4.12에서 시스템 잡음 공분산과 측정 잡음 공분산인 Q, R 행렬은 신호특성 및 RLG의 특성을 정확하게 계측할 수 있는 장비가 있어야 실제에 가깝게 계측할 수 있지만 계측장비가 상당한 고가이기 때문에 Q, R 행렬을 설계 인자로 보고 성능의 추이를 관찰하며 결정하였다. 그리고 Fig. 4.12는 칼만 필터를 계산하

는 순서를 표현한 그림으로 선형 칼만 필터를 나타내고 있지만 확장 칼만 필터의 계산 순서는 선형 칼만 필터와 비슷하다. 내부적으로는 선형화 기준점이 직전의 추정 값을 기준으로 계산하고 계산 순서는 시스템 모델과 측정 모델의 비선형 식을 자코비안으로 선형 근사화 과정의 차이가 있다.

- Size Effect 오차

이상적인 시스템의 경우에 모든 센서의 측정 위치는 한 점에서 이루어져야 하지만 현실적으로는 동일점에 있을 수 없다. 동체가 회전할 때 이러한 중심위치로부터의 가속도계의 위치 Offset은 구심 가속도를 생성시키므로 위치 오차를 유발하며 이러한 현상을 size effect라하고 발생하는 구심 가속도의 크기는 식 4.7과 같이 계산하여 제거하여야 한다.

$$\begin{aligned}\dot{u} &= a_x = -(w_y^2 + w_z^2)x_0 \\ \dot{v} &= a_y = -(w_x^2 + w_z^2)y_0 \\ \dot{w} &= a_z = -(w_x^2 + w_y^2)z_0\end{aligned}\tag{4.7}$$

$$\begin{bmatrix} fx \\ fy \\ fz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(w_y^2 + w_z^2)x_0 \\ -(w_x^2 + w_z^2)y_0 \\ -(w_x^2 + w_y^2)z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \cos \theta \sin \phi \\ -g \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}\tag{4.8}$$

식 4.7에서 a_x, a_y, a_z 는 구심 가속도, w_x, w_y, w_z 는 각속도, x_0, y_0, z_0 는 중심위치로부터의 Offset 거리이다. 계산된 Size Effect 오차는 식 4.4에 적용하여 식 4.8과 같이 계산하고 실제 항법에서 작은 수중 운동체의 경우 위의 Size effect 오차는 미미하여 무시할 수 있으나 잠수함과 같이 대형 수중 운동체의 경우 항법오차의 큰 요인이 된다.



Fig 4.14 ARS test H/W(left) & rotating table(right)

회전형 테이블은 0.088° 의 분해능을 갖는 서보모터를 적용하여 구성하였고 ARM-M4 계열의 마이크로 컨트롤러를 사용하여 모터의 회전속도와 회전각을 정밀하게 제어하는 시스템을 구성하였다. 회전형 테이블의 제어시스템은 Fig 4.15와 같이 구성하였다.

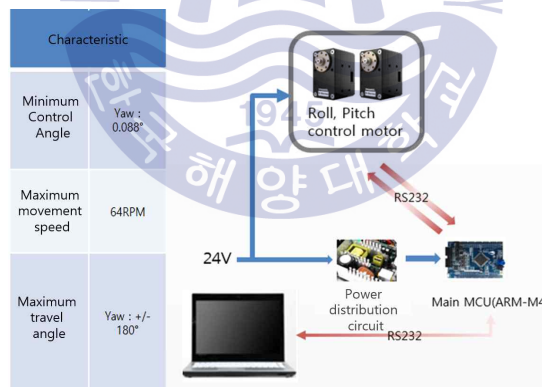


Fig 4.15 Composition of turn table control system

제작한 회전형 테이블을 이용하여 테이블 상단에 설치한 센서 모듈의 성능시험을 하였고 먼저 지자기 센서의 데이터를 분석하였다. 지자기 센서를 정지 상태와 일정 각으로 반복회전 시험을 한 결과 데이터를 그래프 Fig 4.16에 나타냈다.

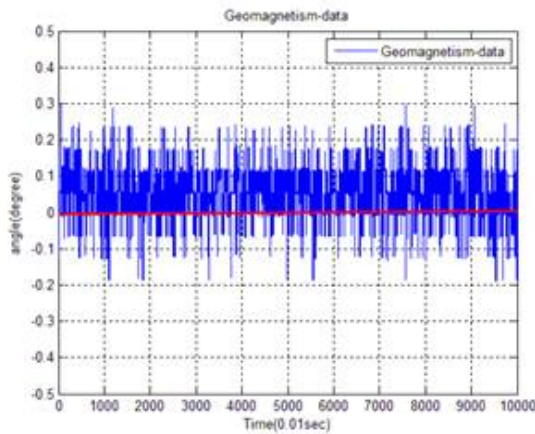
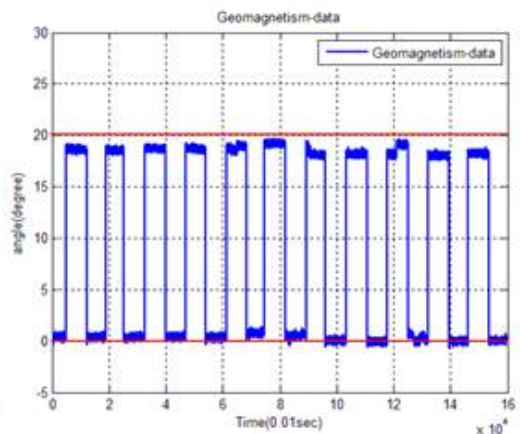


Fig 4.16 Stop Test Results(a)



Exercise(b) Test Results

Fig. 4.16에 나타난 바와 같이 지자기 센서의 반복회전 시험 결과 정지상태의 Heading 오차는 Fig 4. 12(a)와 같이 최소 0.1° 에서 최대 0.3° 이며 Fig 4. 16(b) 과 같이 일정 각 반복 시험($0 \sim 20^{\circ}$) 결과는 평균 2.4° 이상의 오차를 나타내었다. 또한, 10회의 단독 지자기 센서 시험에서 전체적인 오차는 위 그래프의 결과와 크게 벗어나지 않았지만, 반복시험 시 주변 환경에 따라 미세하게 오차의 평균 범위가 달라졌다. 따라서 동작이 없는 상태에서의 지자기 데이터는 큰 오차를 나타내지 않지만, 동작이 있는 시스템에서의 데이터는 신뢰성을 장담할 수 없으며 주변에 자력 영향을 미치는 환경에서는 오차 값이 선형적이지 못하기 때문에 단독으로 사용하기에는 어렵다.

RLG는 주변의 자력 환경에 영향을 받지 않는 큰 장점을 가지고 있지만 각속도 정보를 제공하므로 각 정보를 얻기 위해서 적분을 해야 하는데, 이때 적분으로 인한 시간에 따라 누적오차가 발생한다. 본 시험에서 RLG의 회전 동작 시험 결과를 각속도 데이터로 받아 오일러 각으로 변환하여 적분한 오일러 각 데이터를 Fig 4.17에 나타내었다. Fig 4.17은 정지 상태에서 RLG의 각속도를 오일러 각으로 변환하여 적분한 값으로 약 10분 정도 시험한 결과 적분 오차의 누적으로 인하여 약 1.5° 정도의 적분 오차가 발생하였다.

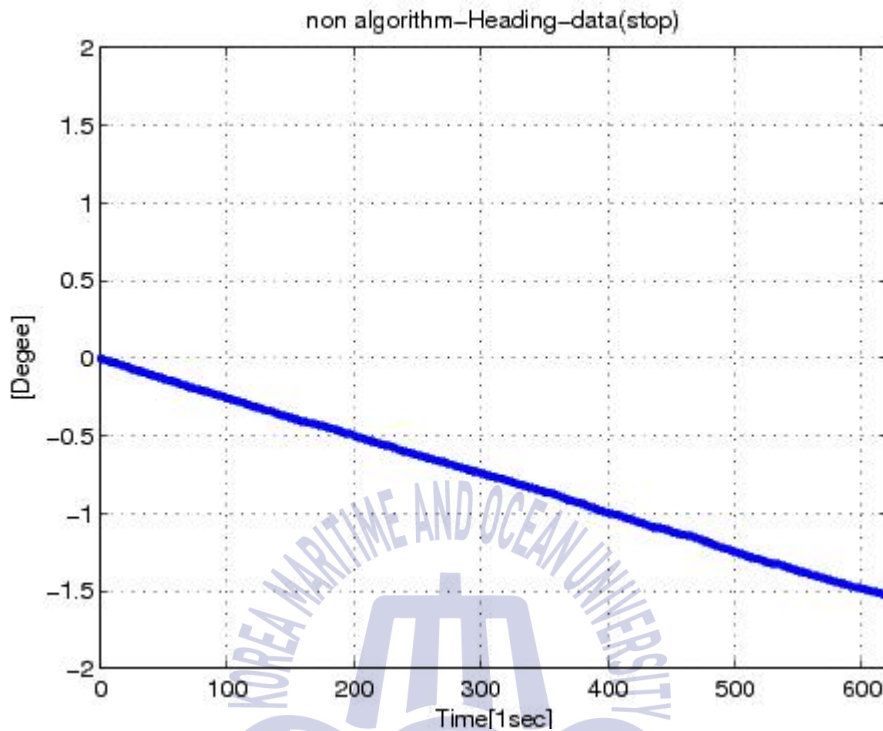


Fig 4.17 non algorithm Heading Data

또한, Fig 4.14의 장치를 사용하여 보정하지 않은 정지 상태에서의 적분 오차와 보정알고리즘을 이용한 보정 데이터를 실험을 통해 실제 취득한 데이터를 이용하여 검증하였다. 실험 조건은 100Hz의 샘플링 타임으로 데이터를 측정하여 약 21분간 126,400개의 데이터를 Fig 4.18과 4.19에 그래프로 나타내었다.

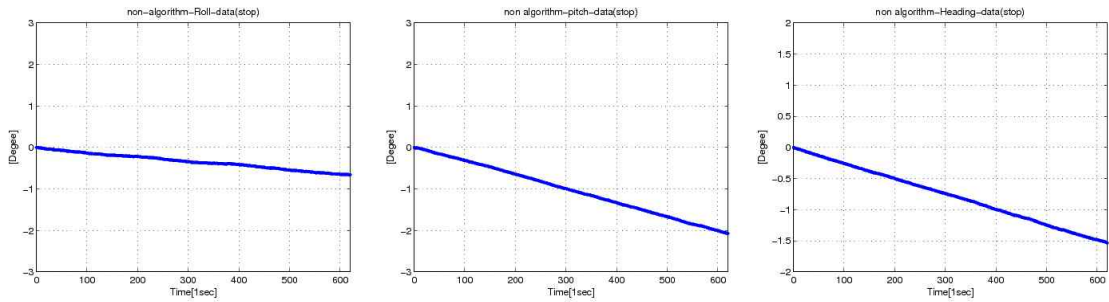


Fig. 4.18 ARS algorithm unused attitude data (Roll, Pitch, Yaw)

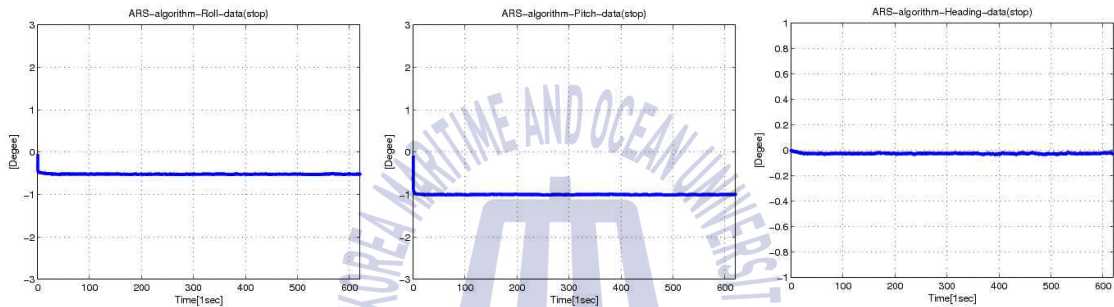


Fig 4.19 ARS algorithm used attitude data (Roll, Pitch, Yaw)

위 그림에서 Fig 4.14 3개의 그래프는 RLG데이터 단독으로 오일러 각 변환을 하여 적분한 그래프로 약 20분 동안 약 2.4도~3.7도까지 적분 오차 가 발생하였다. 하지만 확장 칼만 필터를 사용하여 보정 후 Fig. 3.8의 그래프와 같이 적분 오차는 거의 발생하지 않았다. Roll과 Pitch 각에 각각 발생한 0.3도, 1.2도의 Offset은 RLG를 고정하는 기구와의 오차이다.

다음으로 자세를 일정하게 반복하여 정역으로 회전하여 자세의 오차를 확인하는 시험을 실시하였다. 위 와 동일한 장치를 이용하여 일정시간 동안 $0 \sim -30^\circ$ 구간을 왕복 회전하는 실험을 실시하였고 실험 조건은 100Hz의 샘플링 타임으로 약 83분간 약 500,000개의 데이터를 받아 Fig 4.20~4.22의 그래프로 나타내었다.

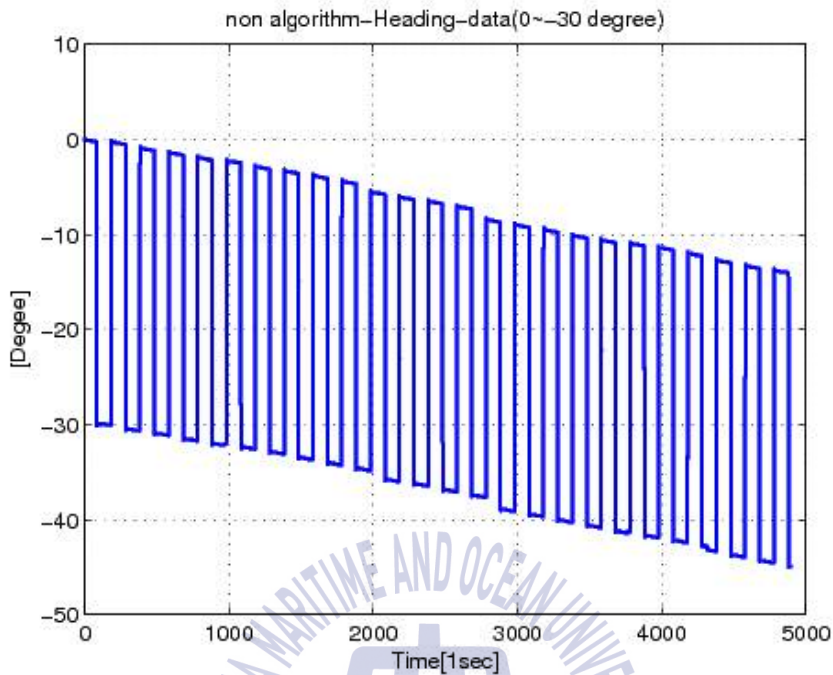


Fig 4.20 Raw Gyro Yaw Angle

Fig 4.20에 나타난 것과 같이 보정되지 않은 Yaw 데이터는 $0 \sim -30^\circ$ 를 약 83분 반복 회전하는 동안 약 12° 이상의 적분 오차 오차를 나타냈다. 또한, 아래 Fig 4.21은 보정용 데이터로 사용되는 지자기 데이터 그래프이다. 그래프에 나타난 것처럼 적분하지 않기 때문에 적분 오차 오차는 없었지만 $0 \sim -30^\circ$ 를 약 83분 반복 회전하여 $6 \sim 7^\circ$ 의 측정 오차를 가짐을 보여준다.

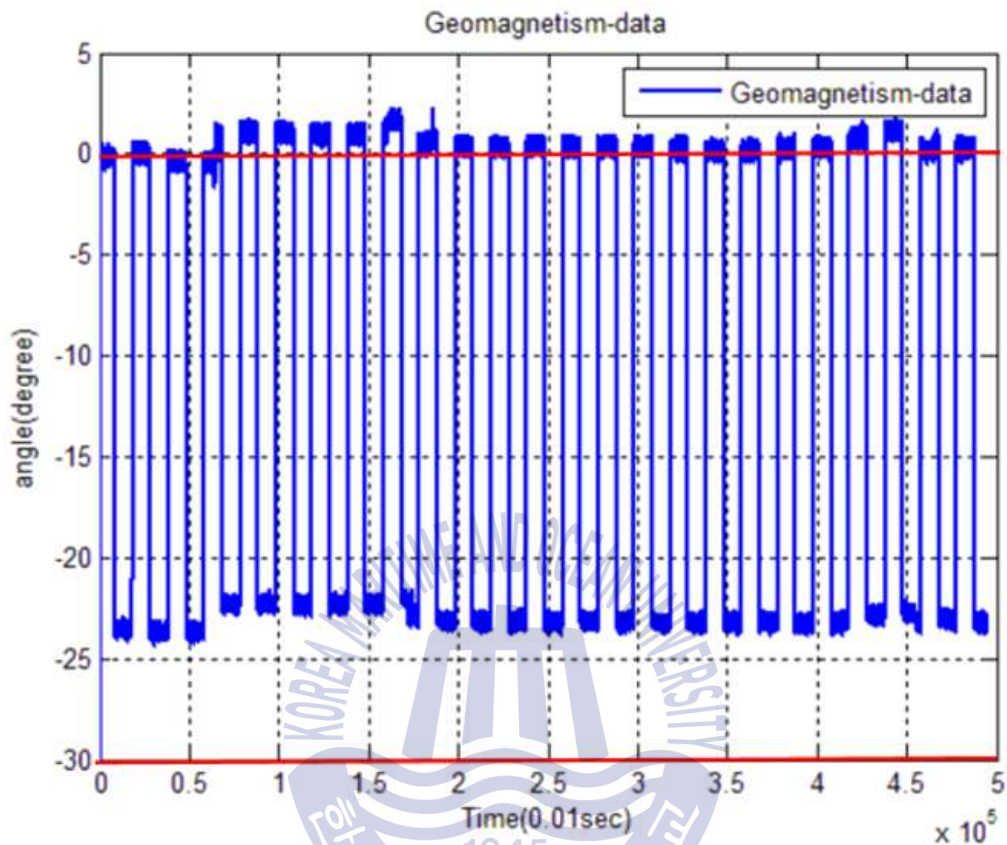


Fig 4.21 Correction Geomagnetic Data

Fig 4.20과 Fig 4.21의 데이터를 확장 칼만 필터를 이용하여 융합한 결과 Fig 4.22과 같은 결과를 얻었다. Fig 4.22의 그래프를 분석해 보면 테스트 장치인 회전 테이블에 적용한 서보모터의 분해능과 관성으로 인해 위치 시작점과 마지막 위치에서의 미세한 오차가 존재하였다. 이는 결과적으로 미소한 차이의 위치 오차를 만들었다. 따라서 Fig 4.22과 같이 시작점의 위치와 마지막 위치에서 약간의 오차를 나타냈지만, 전체 실험에서의 결과는 $0 \sim -30^\circ$ 를 Fig 4.20과 Fig 4.21 보다 정확히 추종하였으며 약 83분의 시험시간 동안 발산하지 않아 제안한 알고리즘의 우수한 성능을 확인할 수 있다.

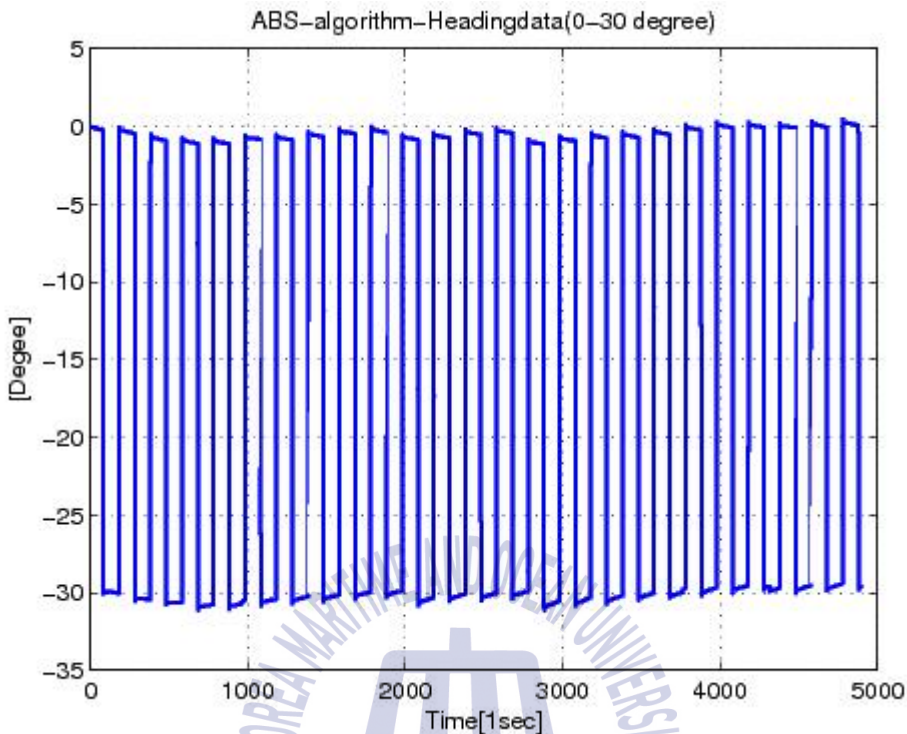


Fig 4.22 Calibrated ARS Yaw Angle

4.1.4 플랫폼 연동 테스트

Turn table 테스트의 결과를 기반으로 연구 중인 ARS의 성능을 확인하기 위해 실제 움직이는 플랫폼에 적용하였다.

Turn table 테스트는 연구 중인 ARS에 만족스러운 성능을 나타내었다. 하지만 실제 플랫폼에 적용하였을 때 외부 환경에 따른 성능은 다른 문제이다. 따라서 다른 환경이 ARS에 미치는 영향을 알기 위해 이동 중 많은 진동을 발생시키는 트랙 기반의 로봇에 Fig 4.23와 같이 적용하였다. ARS는 수중에서 사용하기 위한 시스템으로 연구 되었다. 하지만 수중에서 성능테스트를 진행하면 정확한 성능확인이 어렵다. 따라서 성능확인을 위해 육상 테스트를 진행하였다. 실외 테스트는 Fig 4.24와 같이 실시하였고 결과는 Fig 4.25과 같다.

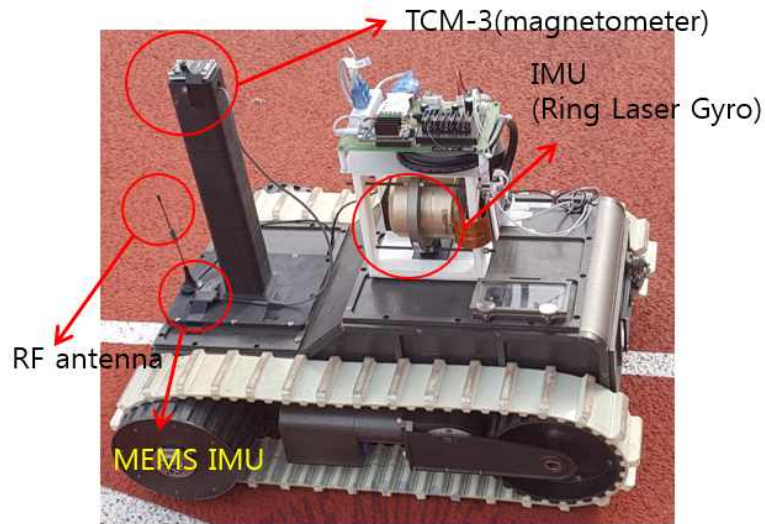


Fig 4.23 ARS Test Equipment

Fig 4.23은 트랙 기반의 로봇에 장착한 ARS이다. 테스트 장치의 구성은 ARS를 구성하는 RLG와 보정용 지자기 센서 TCM-3로 구성되었다. 그리고 추가로 비교용 MEMS 형 IMU를 장착하였고 RF 무선통신을 이용해 실시간으로 데이터를 저장하였다.



Fig 4.24 Outdoor driving test

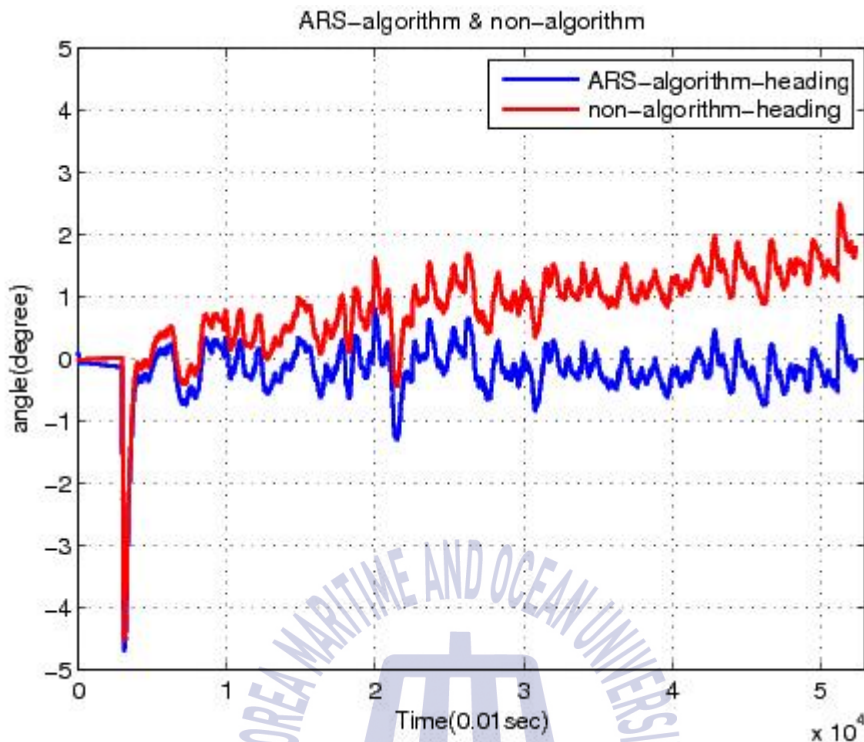


Fig 4.25 Result of outdoor driving test

Fig 4.25에 나타난 결과와 같이 알고리즘을 적용한 결과와 알고리즘을 적용하지 않은 결과를 비교해 보았다.

알고리즘을 적용하지 않은 그래프(붉은색)는 heading 각이 발산하였다. 약 10분의 테스트 시간 중 누적오차는 약 2도 발생하였다. 적분에 의한 오차는 시간의 증가에 따라 급속히 증가하기 때문에 알고리즘을 적용하지 않은 데이터는 추후 급격하게 발산한다. 따라서 알고리즘을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우 현재의 테스트 결과는 약 2도이다. 하지만 오랜 시간 테스트를 진행하면 점점 적분에 의한 오차는 커질 것이다.

실외 테스트 결과 매끈하지 못한 노면을 주행하며 많은 진동에 노출되었다. 하지만 ARS 시스템의 Heading 데이터는 약 0.02~ 최대 0.5 Degree의 오차를 나타냈다. 위 실험 결과, Turn table 실험을 통해 보정 전의 적분 오차 누적량은 약

한 시간 20분의 시험결과 12도 이상 발생하였다. 이를 보정하기 위한 지자기 데이터 또한 측정 오차가 6~8도 이상 발생하였다.

자이로 데이터와 지자기 데이터를 확장 칼만 필터로 보정 한 결과 한 시간 이상의 시험에서 약 0.2~0.4도의 작은 자세 오차를 구할 수 있었다. 이 오차 또한 heading각 시험장치의 기구부 요인에 의해 발생 된 것으로 추정된다. 그리고 실 플랫폼에 적용한 ARS 실험을 통해 ARS의 알고리즘을 검증하였고 약 100m 직선 주행 시 0.02~0.4도 정도의 미세한 오차만이 발생하였음을 알 수 있다.

4.2 하이브리드 수중글라이더의 항법시스템

4.2.1 하이브리드 수중글라이더의 항법시스템 설계

전통적인 수중 글라이더는 기본적으로 정점 추종, 일정방향 주행을 기본으로 하고 이를 바탕으로 다양한 항법 제어기법을 추가할 수 있다. 정점 추정기법은 Fig 4.26과 같이 일정 목표 지점을 향해 수중 글라이더가 주행하게 하며 해당 목표 지점 도달 판단 영역에 들어서면 다음 목표 지점을 향해 주행하는 것이다.

(N. E. Leonard and J. G. Graver, 2001)

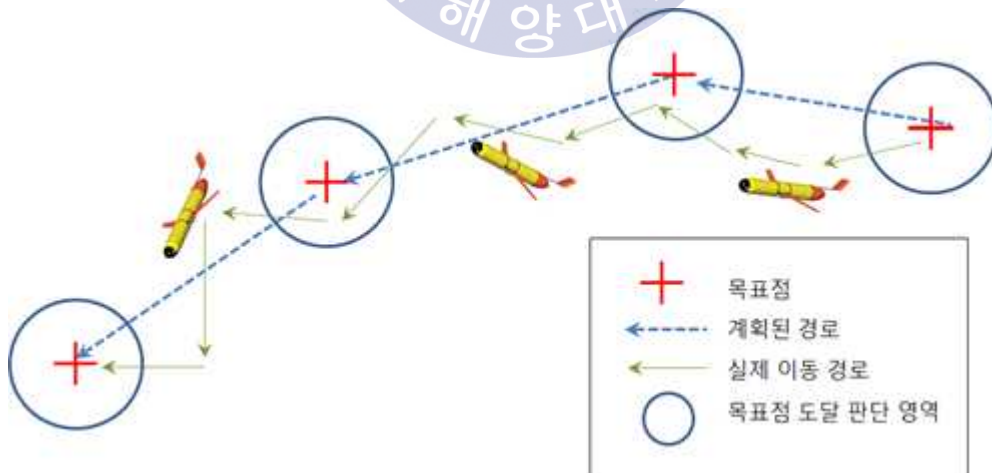


Fig 4.26 Running of a hybrid underwater glider

이때 수중 글라이더의 내부 압력, 배터리 상태 등 수중 글라이더의 자체상태 체크와 Altimeter를 통해 입력된 층돌 등을 측정하고 지능화된 상황판단 및 대처를 통해 수중 글라이더에 입력된 목표를 원활히 수행할 수 있도록 한다. 목표 지점에 도달하기 위한 하이브리드 수중글라이더의 기본 항법 알고리즘은 Fig. 4.27과 같다.

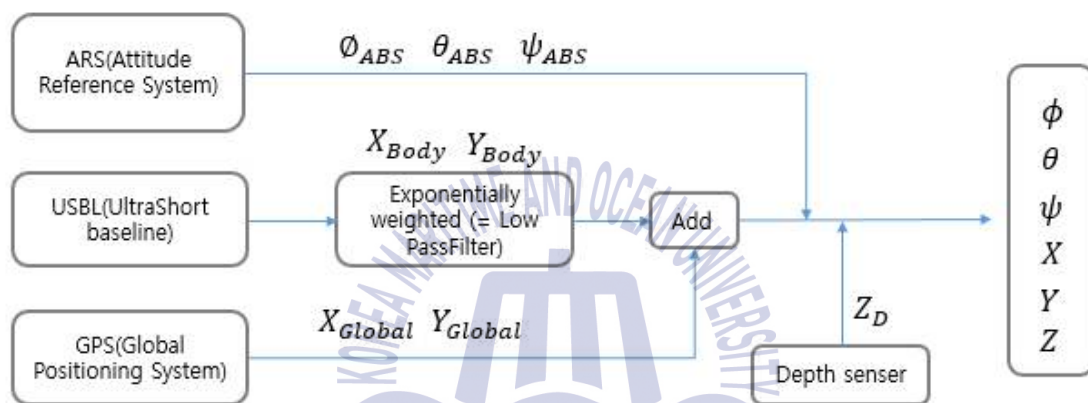


Fig 4.27 Hybrid underwater glider navigation system diagram

위치 및 자세 측정에 사용할 센서들은 수심 측정 센서, 지자기 센서, IMU 센서, GPS이다. 압력센서는 수심을 측정하여 수직 이동량을 측정하며, 지자기 센서와 IMU를 기반으로 하는 ARS에서 하이브리드 수중글라이더의 3축 각도를 계측하고 GPS는 수표면에서 수중 글라이더의 수평 위치를 계측한다. 이때 산술 모델링을 통해 계산된 위치 값에 ARS Heading 값을, 수심측정용 압력 센서에서 수심 값을, GPS에서 수평 위치와 함께 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter)로 자료 융합하여 최적화된 수중 글라이더의 수중 위치 및 속도를 얻어낸다. 이후 수상에서 GPS 측정으로 수중 위치 및 속도 등을 다시 후처리로 누적 오차를 보정하고 위치 측정 센서들의 설치 오차를 보정한다. 계산된 수중 최적위치 및 속도는 수중 글라이더의 피치각, 수평 자세와 부력 조절량을 제어하는데 사용된다.

이와 같은 시스템을 Fig 4.27에 도식화하여 나타내었다.

4.2.2 하이브리드 수중글라이더의 항법시스템 시뮬레이션

위 언급된 수식과 운동 방정식을 이용하여 시뮬레이션을 설계하였고 수식의 타당성을 알기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 4.28에서 둥근 점선으로 나타낸 부분은 하이브리드 수중글라이더의 유체력 운동 방정식에 의해 계산된 속도를 식 4.9 ~4.11 이용하여 수중에서 대략적인 이동 거리를 구할 수 있다. 그리고 Fig 4.28의 붉은 네모 박스에는 위에서 설명한 ARS를 나타낸다.

$$\sum X = X_{u|u}|u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - (W-B)\sin\theta = \Delta X \quad (4.9)$$

$$\sum Y = Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + (W-B)\cos\theta\sin\phi = \Delta Y \quad (4.10)$$

$$\sum Z = Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + (W-B)\cos\theta\cos\phi = \Delta Z \quad (4.11)$$

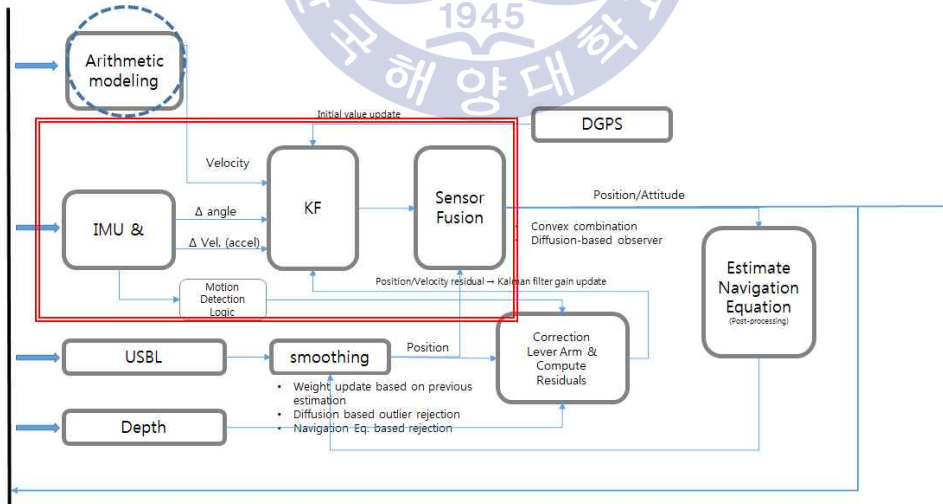


Fig 4.28 Hybrid underwater glider's final navigation system

식 4.9 ~4.11과 수상에서의 GPS 위치 데이터를 기반으로 수중에서의 위치를

계측한다. 하지만 운동 방정식을 기반으로 연산에 의한 위치계측은 오차가 크며 이를 보정하기 위해 무인 수상선에 장착된 USBL Transponder의 위치 데이터를 하이브리드 수중글라이더가 받아 보정한다. 본 연구에 사용된 USBL은 소형USBL로 보통 크고 무거운 USBL의 소형화된 Transceiver를 하이브리드 수중글라이더에 장착하였다. 따라서 수상선에 장착된 Transponder의 위치를 USBL 범위 내에서는 언제나 받을 수 있다. 그러므로 일정이상 위치 오차가 누적되면 무인 수상선의 USBL Transponder 범위로 들어가 위치를 보정 할 수 있다.

이와 같은 시스템을 구축하기 위해서는 USBL의 데이터가 이산시간에 따라 정확하게 받아 져야 하지만 소나를 이용하는 USBL의 특성상 산발적인 데이터 수신과 갑자기 크게 발산했다가 다시 안정을 찾는 등 외부 환경에 의해 수신 상태가 크게 달라진다. 따라서 USBL의 데이터를 좀 더 안정적으로 취득하기 위해 식 4.12과 같이 1차 저주파 smoothing 필터를 사용하였다.

$$\bar{x}_{k-1} = \alpha \bar{x}_{k-2} + (1 - \alpha) x_{k-1} \quad (4.12)$$

$$\because 0 < \alpha < 1$$



Fig 4.29 Acquisition of real-sector USBL data

Fig 4.29는 USBL의 실 해역 데이터를 취득하기 위해 실재해역에서 정확한 거리정보를 확보한 후 데이터를 취득하였다.

최종적으로 하이브리드 수중글라이더가 경로를 추종하기 위해 LOS (Line of Sight) 알고리즘을 이용하여 경유점 추종을 시뮬레이션을 하였다. 하이브리드 수중글라이더의 경로 주행을 위해 설계된 제어기를 사용하여 가시 선(Line of Sight-LOS)방법을 사용하였다. 무인 수중글라이더가 통신을 위해 수면으로 부상 후 GPS 상의 현재 위치와 경유점의 GPS 데이터를 이용하여 계산하였다. 가시선 (Line of Sight)방법은 식 4.13과 같다.

$$\psi_p = \tan^{-1} \left[\frac{Y_k - Y(t)}{X_k - X(t)} \right] \quad (4.13)$$

$$\rho^2(t) = [X_k - X(t)]^2 + [Y_k - Y(t)]^2 < \rho_c^2$$

식 4.13 에서 $[Y(t), X(t)]$ 는 무인 수중글라이더의 위치이며 $[Y_k, X_k]$ 는 경유점의 위치이다. 또한, ρ_c 는 경유점의 반경을 나타낸다. 위 알고리즘과 6자유도 운동 방정식을 이용하여 경유점 추종 시뮬레이션을 실시하였고 시뮬레이션 조건은 Table 9와 같으며 결과는 Fig 4.30과 같다.

Table 9 Hybrid underwater glider simulation conditions

Index	Value
경유 목표 지점의 반경 (ρ_c)	3 (m)
시뮬레이션 시간 (sec)	750(s)
Speed (Knot)	1(Knot)
샘플링 타임	0.1(s)
하이브리드 수중 글라이더 Weight	60(kgf)

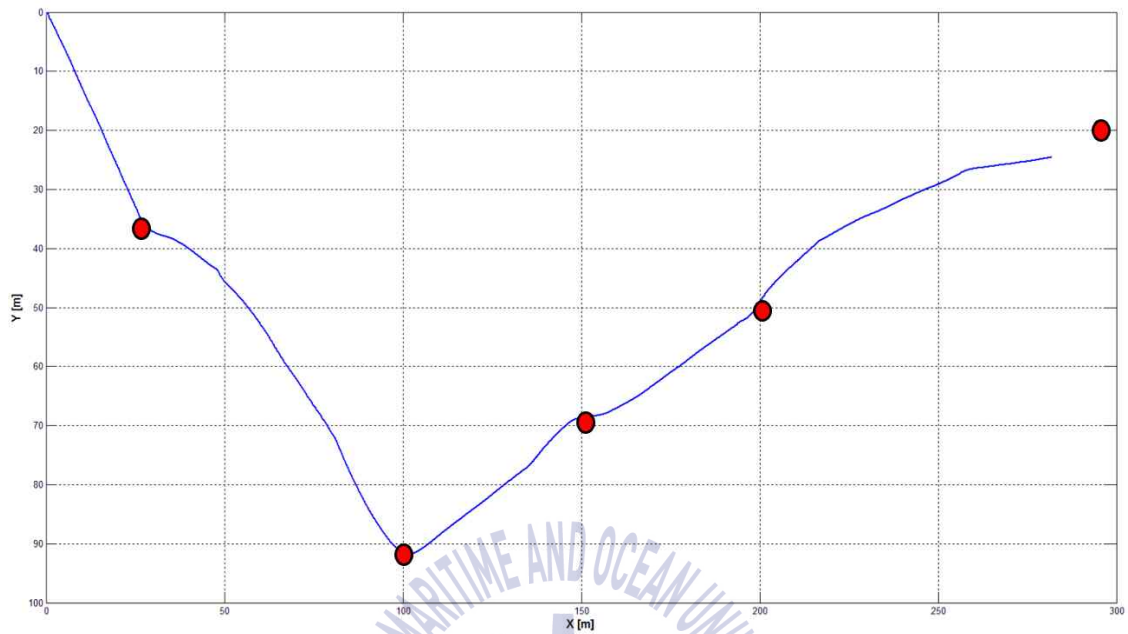


Fig 4.30 Hybrid underwater glider path following simulation

Fig. 4.30의 그래프에서 붉은 점은 하이브리드 수중글라이더가 경유하여야 하는 way point이며, 푸른 선은 글라이더의 이동 궤적이다. 하이브리드 수중글라이더 6자유도 운동 방정식에 유체력과 외부 작용력(외력)에 의한 연성조건까지 고려한 시뮬레이션으로 LOS알고리즘과 제어 입력이 모두 작용함을 알 수 있고 경유점도 정확히 통과함을 알 수 있다.

4.3 무인수상선의 제어시스템 구성

무인수상선은 수상에서 이동하는 운동체로 GPS를 기반으로 하는 항법 시스템을 설계하였다. 수중과는 다르게 수상에서는 통신과 GPS를 제약 없이 사용할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 무인수상선의 역할은 하이브리드 수중글라이더의 위치 보정 및 위치 협력시스템의 기준점으로 사용하고 수상에서 목표 지점까지 이동하기 위해 수중글라이더와 같이 LOS 방식을 사용한다.

4.3.1 무인수상선의 제어시스템 구성



Fig 4.31 Unmanned Surface Vehicle

선체는 Fig 4.31과 같이 L2800 mm×W 1700mm×D450 mm 크기의 고무보트를 사용하여 센서박스, 컨트롤박스, 펌프 배터리, 추진기용 배터리, 모터 드라이버 및 TLM 수신을 위한 수신기, 배터리 및 안테나로 구성되어 있다.

Sensor Box에는 경로 제어를 위한 AHRS, GPS로 구성되었으며, Control box에는 센서 데이터 처리 및 경로 제어 알고리즘을 연산하는 MCU 보드와 통신 모듈, 전원인가용 무선 스위치 모듈이 탑재되어 있다.

전원 시스템은 컨트롤 박스에 내장된 14, 8V, 80A의 배터리, 선체의 25.9V, 400A의 추진기용 배터리로 구하였고 선수 부분의 추진기를 기준으로 시계 반대 방향으로 각각 1번, 2번, 3번 3기의 추진기를 설치하였다. 1번 추진기는 추진 방

향과 횡 방향으로 장착되어 Heading Angle을 제어하며, 2, 3번 추진기는 각각 전진 및 후진 제어에 사용된다. 위 제어시스템의 System structure를 Fig 4.32에 나타내었다.

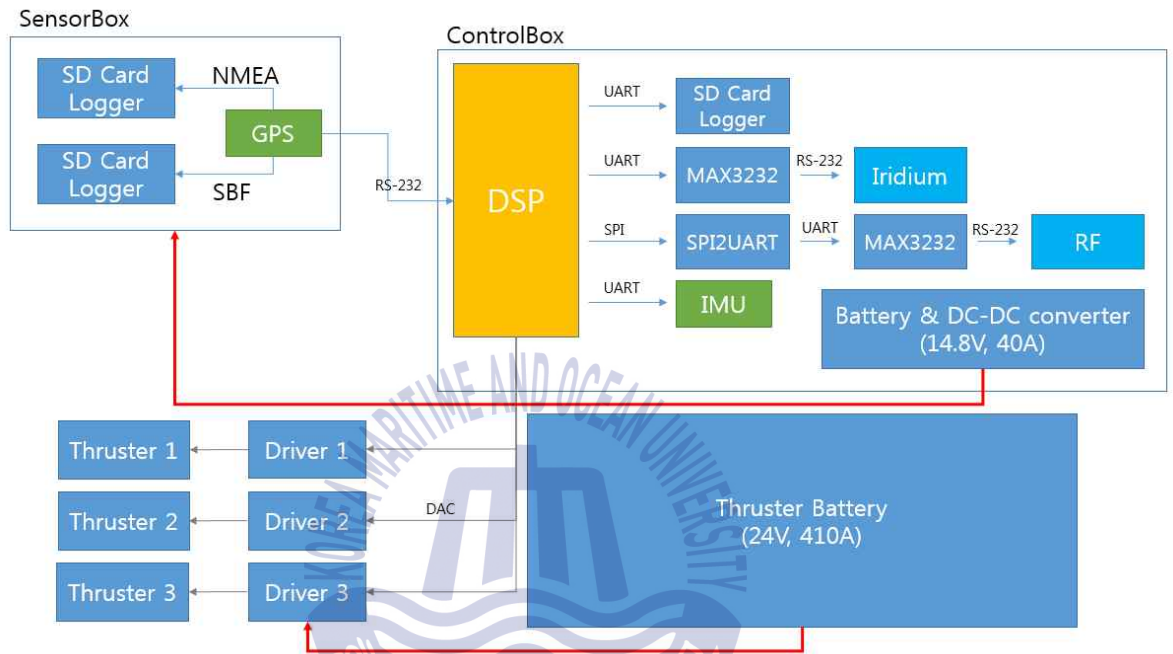


Fig 4.32 System structure of Unmanned Surface Vehicle

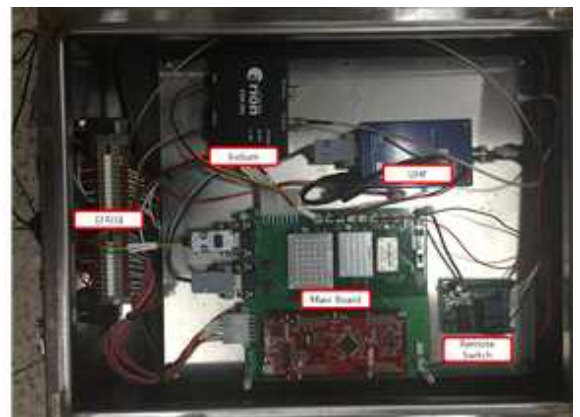


Fig 4.33 Control H/W of Unmanned Surface Vehicle

Fig 4.33의 컨트롤 박스는 Fig 4.22의 시스템 설계를 기반으로 경로 제어를 위한 메인 프로세서와 전원장치가 부착된 메인보드, 무인 수상선과 PC 간의 무선 통신을 위한 VHF 및 Iridium 모듈, 데이터 로깅 모듈, 무인 수상선 전원 스위칭을 맡은 무선 스위치 모듈과 위 장비들을 외부 방수커넥터와 연결하는 단자대로 설계하였다.

메인 제어 프로세서인 DSP 28335는 PC와의 무선 통신 및 경로 제어, GPS 보정알고리즘 연산을 수행하고, 무선 스위치 모듈을 장착하여 무선으로 전원을 ON/OFF를 제어한다.

긴급 상황 시 원격으로 시스템을 초기화하기 위한 방안으로 통신 거리 100m의 외부 부 안테나를 장착하였고 컨트롤 박스에는 통신 거리 2~3Km인 VHF 모듈 및 통신 거리에 영향을 받지 않는 이리듐 모듈이 포함되어 있다.

-기구부 구성

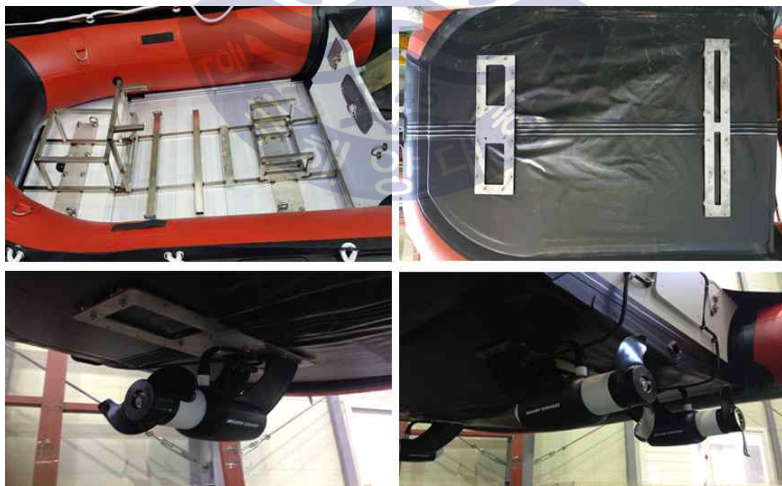


Fig 4.34 Upper & Lower Propeller Mechanics of Unmanned Surface Vehicle

Fig 4.34는 무인 수상선의 추진체 및 제어 시스템을 고무보트에 장착하기 위해 설치한 기구부 골격으로 상부에는 제어 시스템과 센서 시스템 그리고 배터리가

장착되며 하부 골격에는 위 언급과 같이 전방 횡 방향 추진체 1기와 2기의 후방 추진체를 장착한다.

Fig 4.35와 같이 추진체를 제어할 수 있는 모터 드라이브 3기를 장착할 수 있는 상부 기구를 제작하여 항행 시 기구 부의 안정성을 확보하였다.

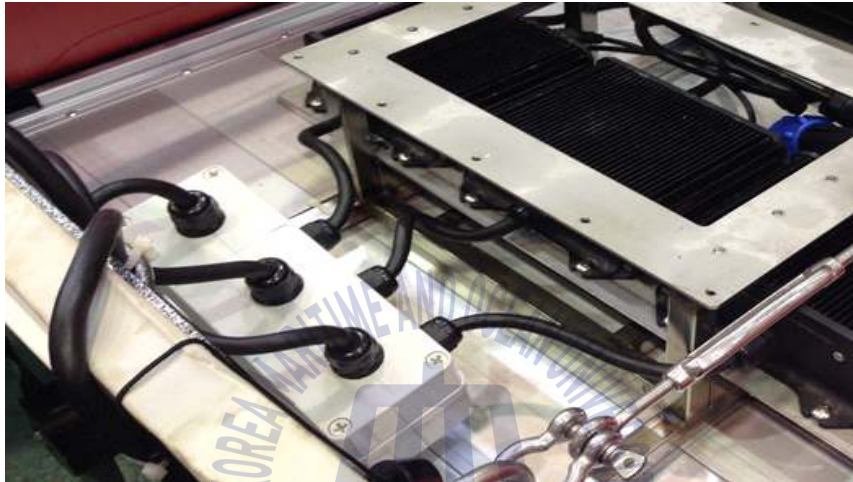


Fig 4.35 Mechanism for mounting motor drive for Unmanned Surface Vehicle



Fig 4.36 Unmanned Surface Vehicle control system installed

Fig 4.36은 상부 전장 시스템이 고정 기구부와 장착이 완료된 사진으로 배터리 및 제어 Box 그리고 상부의 GPS와 AHRS로 구성된 센서 Box의 실장 된 사진이다.

4.3.2 무인수상선의 센서 시스템 구성



Fig 4.37 sensor system of Unmanned Surface Vehicle

Fig 4.37은 무인 수상선의 GPS 기반의 항법을 구현하기 위한 센서 시스템을 구현한 센서 Box이다.

GPS의 위치 데이터를 활용하여 현재의 위치와 다음 진행 위치를 실시간으로 업데이트할 수 있는 시스템을 설계하였고 GPS에서 출력되는 Heading Angle의 데이터는 본 논문에 적용될 저속의 수상선에서는 큰 오차를 내포하고 있으므로 별도의 Heading Angle을 검출할 수 있는 MEMS 형 AHRS를 별도로 장착하였다.

마지막으로 위치 협력 항법을 구현하기 위해 필수 센서인 USBL과 수중통신 모뎀을 별도의 시스템으로 설계하였고 Fig 4.38과 같이 장착하였다.



Fig 4.38 USBL mounted on Unmanned Surface Vehicle

4.4 무인수상선의 항법시스템

4.4.1 무인 수상선 항법시스템 설계

무인 수상선은 정점 추종, 일정방향 주행을 기본으로 하고 이를 바탕으로 다양한 항법 제어기법을 추가할 수 있다. 정점 추정기법은 Fig 4.39와 같이 일정 목표 지점을 향해 무인수상선이 주행하게 하며 해당 목표 지점 도달 판단 영역에 들어서면 다음 목표 지점을 향해 주행하는 LOS 알고리즘을 이용한다.

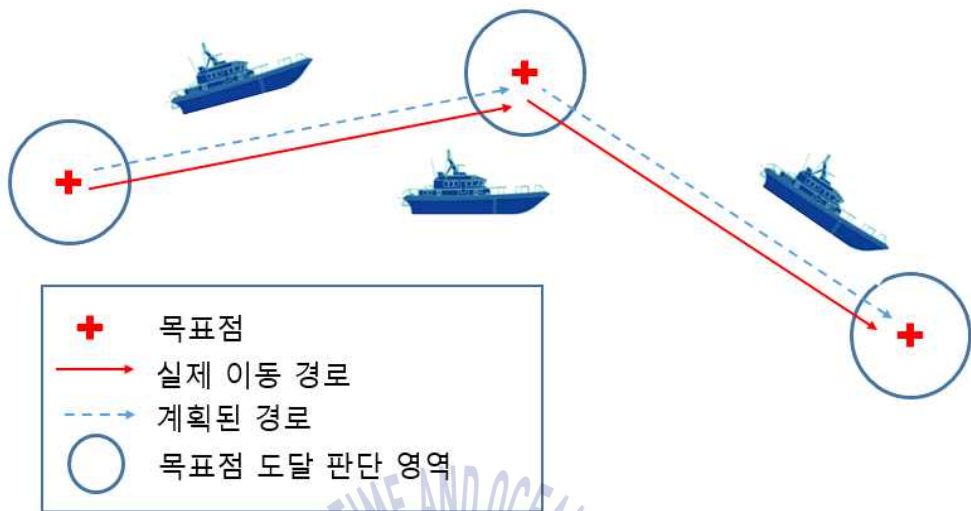


Fig 4.40 Running of Unmanned Surface Vehicle

이때 무인 수상선의 지능 알고리즘을 이용한 상황판단 및 대처를 통해 무인 수상선에 입력된 목표를 원활히 수행할 수 있도록 적절한 추진체의 추진력을 제어하여 목표 지점에 도달하고 GPS를 통해 목표 지점의 도달 여부를 판단하고 이와 같은 무인 수상선의 항법은 Fig 4.40과 같다.

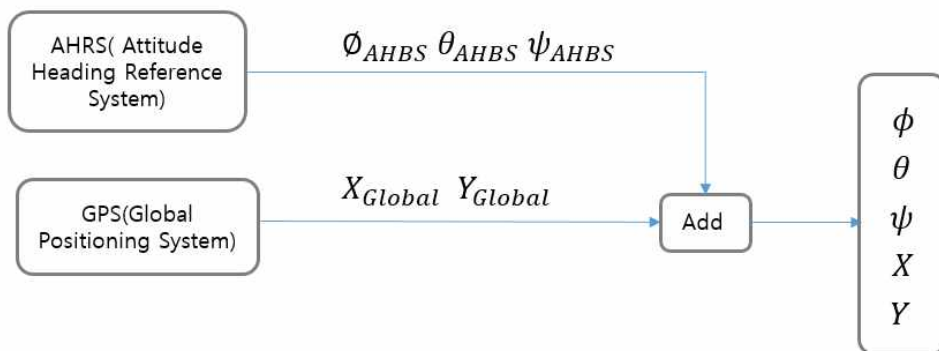


Fig 4.41 Navigation system diagram of Unmanned Surface Vehicle

위치 및 자세 측정에 사용할 센서들은 AHRS센서와 GPS이다. AHRS에서 무인 수상선의 3축 각도를 계측하고 GPS는 수표면에서 무인 수상선의 수평 위치를 계측한다. 이때 LOS 알고리즘을 이용하여 다음 목표 지점까지의 방향을 계산하고 GPS에서 수상선의 수상위치 및 속도를 얻어낸다. 계산된 수상의 위치 및 속도는 무인 수상선의 수평 자세와 Heading Angle을 제어하기 위한 추진체의 입력 변수로 사용된다. 이와 같은 시스템을 Fig 4.41에 도식화하여 나타내었다.

4.4.2 무인 수상선 항법시스템 시뮬레이션

수상에서의 무인수상선 거동은 선박과 똑같다. 따라서 선박에서 사용하는 3자유도 운동 방정식을 단순화하여 시뮬레이션을 설계하였다. 위 2.5 절에서 설계한 운동방정식에 Forward Speed model(surge 방향)을 식 4.14와 같이 나타내었다.

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_u u - X_{|u|u}|u|u = \tau_1 \quad (4.14)$$

또한, 2 DOF 선형 Meuvering model (Sway & Yaw)을 식 4.15과 같이 표현할 수 있다.

$$M\dot{\nu} + N(u_0)\nu = b\delta \quad (4.15)$$

여기서 $\nu = [\nu, r]^T$ 는 동체의 속도이며 δ 은 선박 러더의 각도이다. 하지만 본 연구의 무인수상선은 러더가 없는 타입으로 추진체의 추력을 입력으로 변수로 이용하여 상수로 무인수상선의 Heading Angle을 제어한다.

위식을 바탕으로 무인수상선의 3자유도 운동 방정식을 바탕으로 식 4.16~4.18로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\sum X = & X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq \\ & + X_{vr}vr + X_{rr}rr - \sin\theta + F_x + N_x = \Delta X\end{aligned}\quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}\sum Y = & Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur \\ & + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + \cos\theta\sin\phi + F_y + N_y = \Delta Y\end{aligned}\quad (4.17)$$

$$\begin{aligned}\sum N = & N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp \\ & + N_{pq}pq + N_{uv}uv + (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi + \sin\theta + N_z = \Delta N\end{aligned}\quad (4.18)$$

위 식 3.16~3.18에서 계산된 X, Y, Yaw 데이터를 LOS 알고리즘을 이용하여 원하는 목표 지점으로 이동하는 알고리즘을 설계하였다.

$$\psi_U = \tan^{-1} \left[\frac{Y_k - Y(t)}{X_k - X(t)} \right] \quad (4.19)$$

$$\rho^2(t) = [X_k - X(t)]^2 + [Y_k - Y(t)]^2 < \rho_c^2$$

식 3.20 에서 $[Y(t), X(t)]$ 는 무인수상선의 위치이며 $[Y_k, X_k]$ 는 경유점의 위치이다. 또한 ρ_c 는 경유점의 반경을 나타낸다.

위 알고리즘과 3자유도 운동 방정식을 이용하여 경유점 추종 시뮬레이션을 실시하였고 시뮬레이션 조건은 Table 10과 같으며 결과는 Fig 4.42와 같다.

(Tristan Perez and Alejandro Donaire, 2009)

Table 10 Unmanned Surface Vehicle simulation conditions

Index	Value
경유 목표 지점의 반경 (ρ_c)	3 (m)
시뮬레이션 시간 (sec)	600(s)
Speed (Knot)	1(Knot)
샘플링 타임	0.1(s)
무인 수상선 Weight	150(kgf)

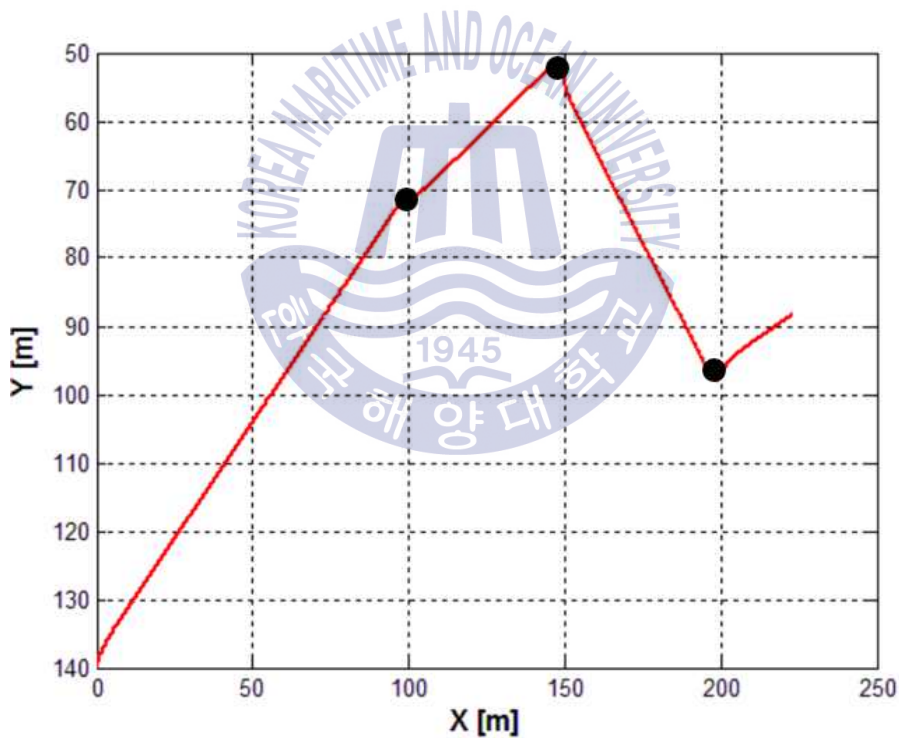


Fig 4.42 Unmanned Surface Vehicle path following simulation

Fig 4.42의 그래프에서 검은 점은 무인수상선이 경유하는 way point이며, 붉은 선은 무인수상선의 이동 궤적이다. 무인수상선 3자유도 운동방정식에 유체력과

외부 작용력(외력)에 의한 연성조건까지 고려 한 시뮬레이션으로 LOS 알고리즘과 제어 입력이 모두 작용함을 알 수 있고 경유점도 정확히 통과함을 알 수 있다.

4.4.3 무인 수상선 항법시스템 테스트

무인수상선의 항법알고리즘을 검증하기 위해 Fig 4.43과 같이 실험계획을 수립하였다.



Fig 4.43 Sea area navigation test of Unmanned Surface Vehicle

- 수상에서의 위치추종 테스트

무인수상선의 항법 알고리즘을 검증하기 위해 한국해양대학교 요트 계류장에서 시험을 실시하였고 실제 선박이 운용되는 장소이기 때문에 안전을 고려하여 시험을 실시하였다.

실험에 사용된 수상선의 제원은 Table 11과 같으며 시험결과는 Fig 4.44 및 Fig 4.45와 같다.

Table 11 Unmanned Surface Vehicle specification

Index	Value
무게	150(kgf)
크기	1500(mm) x 3000(mm) x 400(mm)
최고 이동속도	3(Knot)
항법 센서	DGPS, AHRS
육상 통신방식	RF 통신, 위성통신
육상과의 통신 거리 (RF)	1(Km)
육상과의 통신 거리 (위성 통신)	거리제한 없음

실험 조건은 무인 수상선이 지정된 위치로 정확하게 위치 할 수 있는지 확인 하는 실험으로 한국 해양대학교 요트 계류장을 Start_point로 정의하고 수직 방향 (90° 방향)으로 수상의 임의의 지점(End_point)으로 이동하는 실험을 실시하였고 이때 Start_point와 End_point의 거리는 300m이며 두 위치의 좌표는 GPS를 이용하여 좌표를 미리 무인 수상선에 입력시켜 두었다. 또한, USBL의 성능 테스트를 함께 진행하였고 항법에 사용된 GPS 위치 데이터와 USBL의 데이터를 비교하여 협력 항법에 사용할 USBL의 성능도 함께 검증하였다.



Fig 4.44 Sea area navigation test result

Fig 4.45는 Start_point에서 End_point로 300m 이동 시 위치 오차를 GPS를 통해 나타낸 결과이다. 실 해역에서 300m의 두 거리를 평균 1.25m/s로 이동하였고 최종 End_point에서의 평균 위치 오차는 8.24m를 나타냈다.

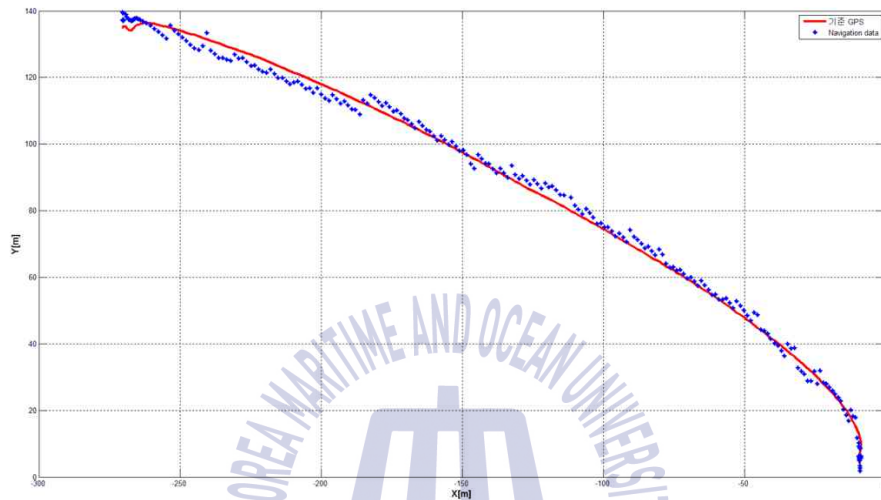


Fig 4.45 Sea area navigation test result graph

위 결과 그래프에서 붉은색 그래프는 기준으로 사용한 GPS 데이터이며 파란 점으로 표현된 데이터는 무인수상선의 실제 궤적이다.

제5장 하이브리드 수중글라이더(follower)와 무인 수상선(leader)의 협력항법

5.1 협력(leader-follower) 항법 알고리즘

하이브리드 수중글라이더는 방향 추종 항법과 정점 추종 항법, 정점 대기 항법, 저공 주행 항법 등을 이용하여 장거리 항행한다. 이처럼 다양한 주행 모드를 구현할 수 있다. 하지만 기존의 추진체의 추력에 의지하는 AUV(Autonomous Underwater Vehicles)와는 다르게 장거리 항행을 위해 기본적으로 정현파 형태의 주행을 하여 기존의 AUV 항법과는 매우 다르다. AUV는 수평운동을 하여 해저면과 평행 운동하여 DVL과 같은 센서를 이용하여 자신의 위치를 추정하는 항법을 기본으로 한다. DVL 기반의 항법은 속도를 직접적으로 검출하여 1차 적분을 통해 위치를 효율적으로 계측한다. 수중 글라이더는 에너지 효율을 극대화하기 위해 자체에 설치한 부력엔진을 제어하여 수중에서 자유낙하를 하고 이 힘을 동체에 설치된 날개를 활용하여 전진하여 정현파 운동을 하는 구조이다. 따라서 DVL과 같은 센서로 동체의 속도를 정밀하게 계측할 수 없다. 그 이유는 sinwave 형태의 항행 시 해저 면과의 수평각을 주행 중에 유지 할 수 없어 정확한 속도 검출에 어려움이 있기 때문이다. 따라서 기존의 수중 글라이더 형태의 운동체는 수상에서 GPS를 이용하여 현재 자신의 위치를 계측하고 앞으로 가야 할 방향을 계산한 후 동체에 부착된 자세세서를 이용하여 Heading 각만을 의지하며 직선으로 주행한다.

수중 글라이더는 정현파 운동으로 AUV와 같이 수평운동을 하기가 어려우나 하이브리드 수중 글라이더는 추진체를 이용하여 수평운동을 할 수 있다. 이러한

모드를 이용하여 수상선과의 협력 항법을 수행하면 구조적으로 수중 항법 오차가 많은 수중 글라이더의 항법 오차를 대폭 줄여 보다 정밀한 항법을 구현할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존에 글라이더 항법 시스템을 탈피하여 무인선과의 협력 항법과 제어시스템에 관해 연구하였다. 협력제어 시스템은 하이브리드 수중 글라이더(follower)와 무인 수상선(leader)의 위치를 공유하여 두 운동체 간의 일정 거리 및 각도를 유지하며 항행하기 위해 각 시스템의 항법 시스템을 설계하였고 각각의 항법을 하나의 협력제어 시스템으로 연결하는 알고리즘을 신경망-PID 병렬제어기를 이용하여 설계하였다. 신경망을 이용한 직접 적응제어기의 신경망 제어기는 대부분의 신경망 제어기가 시스템의 동특성을 식별기에 학습한 후 학습된 정보를 이용하여 제어기를 설계하는 것과 달리 제어 대상 비선형 시스템의 동특성을 학습하지 않고 직접 기준입력과 시스템의 출력 차가 최소화하도록 제어 신호를 출력하는 것이다.

이를 구현하기 위해 소형 USBL의 데이터 취득 부분인 Transceiver를 하이브리드 수중글라이더에 장착하고 무인 수상선인 무인수상선에 Transponder를 장착하여 하이브리드 수중글라이더가 USBL의 범위 안에서 언제든지 무인수상선과 자신의 위치를 알 수 있는 시스템을 구축한다.

5.2 협력제어 시뮬레이션

협력제어 시스템을 설계하기 위해 필요조건은 두 운동체 각각의 항법이 존재해야 하며 이러한 항법을 특수한 조건에 의해 하나의 항법으로 두 운동체의 위치, 방향 및 속도정보를 공유하고 특히 GPS 기반의 항법을 가지는 무인수상선(leader)의 위치와 속도 정보를 수신할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 충족시키기 위해 하이브리드 수중글라이더(follower)는 기존의 sinwave형태의 주행이 아닌 추진체를 이용한 수평 주행해야 한다. 수중통신 범위 내로 접근하면 두 운동

체의 위치와 속도 정보를 공유하며 협력 이동하는 개념도를 Fig 5.1에 나타내었다.

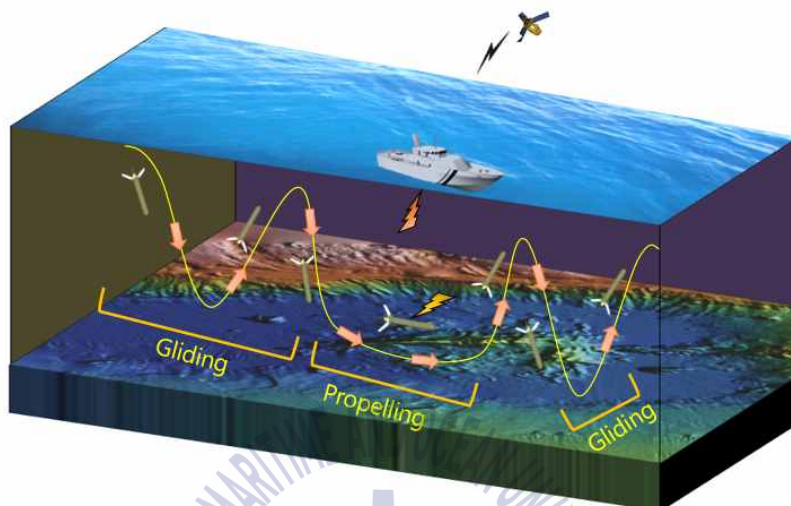


Fig 5.1 Hybrid underwater glider and Unmanned Surface Vehicle leader-follower navigation control

Fig 5.1에 나타낸 것과 같이 하이브리드 수중글라이더는 별도의 항법을 수행하며 일정 조건에 따라 무인수상선에 접근하여 무인수상선의 반경을 선회한다. 이때 GPS 기반의 무인수상선 위치 데이터를 USBL데이터와 연산하여 최종적으로 하이브리드 수중글라이더의 위치를 정확히 계측하며 자신의 위치를 보정하고 이때 무인수상선은 위치 정보 및 간단한 미션 정보를 수중통신모뎀을 통해 하이브리드 수중글라이더에 전송한다. 정보교환 및 위치 보정이 완료되면 하이브리드 수중글라이더는 수면으로 부상하지 않아도 되어 에너지 소비를 줄일 수 있고 주어진 미션을 신속하게 수행한다. 또한, 하이브리드 수중글라이더는 무인수상선의 이동궤적을 따라가며 별도의 미션을 수행할 수도 있고 반대로 무인수상선이 하이브리드 수중글라이더를 따라가며 필요한 임무를 수행할 수 있다. 이러한 시스템을 구현하기 위해 두 이동체의 항법 시스템을 연결해줄 새로운 항법기술이 필요하다.

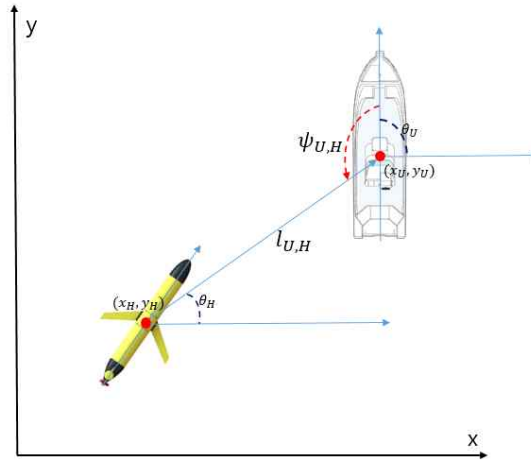


Fig 5.2 leader-follower navigation control of location sharing

무인 수상선을 기준으로 하이브리드 수중글라이더의 상대 위치와 자세 관계는 식 5.1과 같이 나타낼 수 있다.

무인 수상선의 위치 및 자세는 (x_U, y_U, θ_U) 와 같고 하이브리드 수중글라이더는 (x_H, y_H, θ_H) , 그리고 두 운동체 사이의 각도 $\psi_{U,H}$, 거리는 $l_{U,H}$, 그리고 운동체 각각의 Heading Angle은 θ_H, θ_U 이다.

$$\begin{aligned} x_H &= x_U - \cos\theta_U + l_{U,H}\cos(\psi_{U,H} + \theta_U) \\ y_H &= y_U - \sin\theta_U + l_{U,H}\sin(\psi_{U,H} + \theta_U) \end{aligned} \quad (5.1)$$

식 5.2에서 하이브리드 수중글라이더와 무인수상선의 위치를 일정하게 제어하며 항행하기 위해 제어되어야 할 변수는 하이브리드 수중글라이더의 Heading Angle과 거리이다. 따라서 하이브리드 수중글라이더가 추종해야 하는 Heading Angle은 식 5.2로 계산 할 수 있다.

$$\psi_{HUG}(t) = \tan^{-1} \left[\frac{Y_{USV}(t) - Y_{HUG}(t)}{X_{USV}(t) - X_{HUG}(t)} \right] + \theta_{USV} \quad (5.2)$$

또한 하이브리드 수중글라이더와 무인 수상선과의 거리는 식 5.3을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\rho(t) = [X_{USV}(t) - X_{HUG}(t)]^2 + [Y_{USV}(t) - Y_{HUG}(t)]^2 \quad (5.3)$$

본 논문에서는 수상선에 대한 수중 글라이더 사이의 상대 각도 $\psi_{U,H}$, 상대 거리 $l_{U,H}$ 를 일정하게 유지하며 협력제어 되는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 위 언급한 두 제어변수를 신경망-PID 병렬 제어기로 제어하였다.

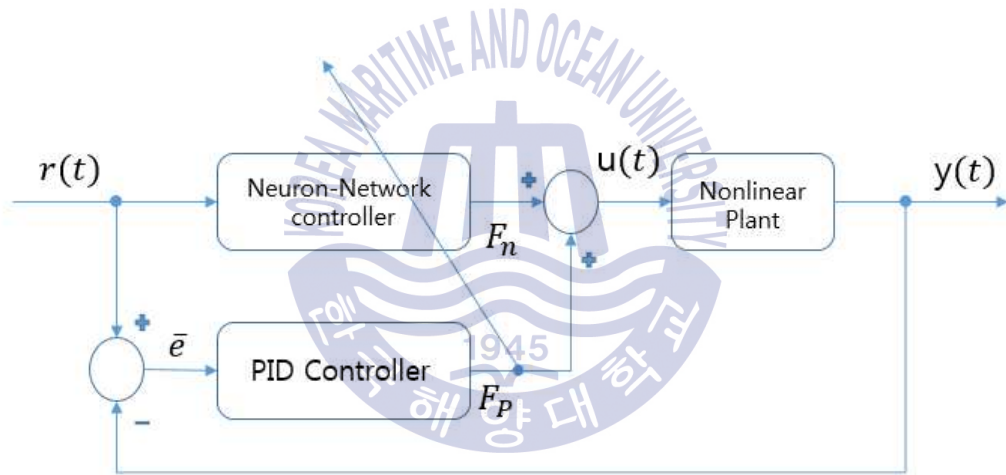


Fig 5.3 Neural network-PID parallel controller

위 그림에서 병렬 제어기의 입력은 목표 값과의 오차에 의해 PID 제어기의 피드백 F_P 를 출력하게 된다. 신경망 제어기는 입력 값만을 이용하여 무감독학습으로 학습하게 되고 학습에 필요한 목적함수는 PID 제어기의 출력값인 F_P 값의 2차 함수로 이 값이 극히 작을 때 까지 신경망제어기는 실시간으로 자기학습을 한다. 즉 학습오차가 0으로 접근한다는 것은 시스템의 목표 값과 입력값의 오차가 0으로 줄어드는 것을 나타낸다.

5.2.1 신경망-PID 병렬제어기를 적용한 하이브리드 수중 글라이더 (follower)의 Heading Angle 제어

먼저 협력제어에 사용되는 시그모이드 함수는 식 5.4와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.4)$$

Fig 5.3에서 PID 제어기의 출력 값을 학습 신호로 사용하고 새로운 가중치를 계산하기 위해 학습 오차에 해당하는 목적함수를 식 5.5에 나타내었다.

$$E(t) = \frac{1}{2} [o_k(t) - y_{kd}(t)]^2 \quad (5.5)$$

식 5.5에서 $o_k(t)$ 는 신경망제어기에서 목표한 값이며 $y_{dk}(t)$ 는 실제 신경망 제어기에서 출력 되는 값이다. 그러나 비선형 시스템에서 신경망 제어기의 출력값 $y_{dk}(t)$ 를 정확하게 학습할 수 없다. 그 이유는 비선형의 동적 특성을 가진 플랫폼은 정확한 수학적 묘사가 어렵다. 따라서 신경망 제어기의 원하는 출력 값은 불분명한 목적패턴을 의미하고 목적패턴을 구할 수 없을 때는 무감독 학습방법으로 학습해야 한다.

식 5.5에서 $y_{dk}(t)$ 를 명확하게 구할 수 없어 목적함수를 식 5.6과 같이 나타냈다.

$$E(t) = \frac{1}{2} [F_P(t)]^2 \quad (5.6)$$

$$F_P(t) = K_p(x_d - x_m) + K_d(\dot{x}_d - \dot{x}_m) + K_i \int (x_d - x_m) dt$$

식 5.6에서 x_d 는 목표 Heading Angle, x_m 는 실제 Heading Angle이다.

Fig 5.3에서 나타낸 것과 같이 식 5.5와 식 5.6은 같은 속성을 가지고 식 5.5의 학습오차가 0으로 접근한다는 것은 실제 시스템의 오차도 0으로 수렴함을 의미한다. 여기서 목적함수 $E(t)$ 를 최소화 하기 위해 하이브리드 수중글라이더의 자

세를 제어하는 것과 같이 점진하강(Gradient Decent)법을 이용한 역전파 알고리즘을 사용한다.

출력층의 목적함수 변화량을 구하기 위해 체인룰을 이용하여 식 5.7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial \omega_{kj}} &= \frac{\partial E}{\partial s_k} \frac{\partial s_k}{\partial \omega_{kj}} \\ \frac{\partial E}{\partial s_k} &= \frac{\partial E}{\partial o_k} \frac{\partial o_k}{\partial s_k} = o_k(o_k - y_{dk})(1 - o_k) \\ \therefore \delta_k &= -\frac{\partial E}{\partial s_k} = o_k(1 - o_k)(y_{dk} - o_k)\end{aligned}\tag{5.7}$$

변화량 δ_k 에서 $(y_{dk} - o_k)$ 는 신경망의 학습오차 이므로 PID 피드백 Angle인 F_P 에 비례한다. 따라서 식 5.8과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_k = o_k(1 - o_k)F_P\tag{5.8}$$

다음 출력층의 샘플링 단계 가중치 변화량과 값은 식 5.9와 같다.

$$\begin{aligned}\Delta W_{kj}(t+1) &= \eta \delta_k o_j + \alpha \Delta W_{kj}(t) \\ W_{kj}(t+1) &= W_{kj}(t) + \Delta W_{kj}(t+1)\end{aligned}\tag{5.9}$$

식 5.9에서 η 는 학습율 α 는 모멘텀률이고 모멘텀률은 학습규칙에 나타나는 하나의 계수로써 학습 중에 과거 각종 모수들의 조정방향을 현재의 학습에 의한 모수조정에 반영한다. 또한 o_j 는 출력층의 출력 값이다.

마지막으로 은닉층 노드 가중치에 대한 오차학습의 변화량은 식 5.10과 같다.

$$\delta_j = \sum_{k=1}^m [\delta_k W_{kj}] o_j (1 - o_j)\tag{5.10}$$

은닉층의 샘플링 단계 가중치 변화량과 값은 식 5.11과 같다.

$$\Delta W_{ji}(t+1) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta W_{ji}(t) \quad (5.11)$$

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) + \Delta W_{ji}(t+1)$$

5.2.2 신경망-PID 병렬제어기를 적용한 하이브리드 수중글라이더(follower)의 위치 제어

협력제어 시 수상선에 대한 하이브리드 수중글라이더의 상대 위치 및 자세를 제어하는 방법 또한 위에 언급된 것과 같이 Heading Angle 제어와 동일한 제어기에 의해 제어된다.

우선 신경망 PID 병렬 제어기에 사용되는 시그모이드 함수는 식 5.12와 같고 학습 오차는 식 5.13과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.12)$$

$$E(t) = \frac{1}{2} [o_k(t) - y_{kd}(t)]^2 \quad (5.13)$$

목적함수는 식 5.14와 같고

$$E(t) = \frac{1}{2} [F_P(t)]^2$$

$$F_P(t) = K_p(x_d - x_m) + K_d(\dot{x}_d - \dot{x}_m) + K_i \int (x_d - x_m) dt \quad (5.14)$$

Heading Angle제어 와 동일한 루프를 가지고 제어된다. 따라서 위치제어 신경망-PID 병렬 제어기의 출력층의 가중치 변화량과 값은 식 5.15와 같다.

$$\Delta W_{kj}(t+1) = \eta \delta_k o_j + \alpha \Delta W_{kj}(t) \quad (5.15)$$

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) + \Delta W_{kj}(t+1)$$

또한, 은닉층 노드 가중치에 대한 오차학습의 변화량은 식 5.16과 같다.

$$\Delta W_{ji}(t+1) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta W_{ji}(t) \quad (5.16)$$

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) + \Delta W_{ji}(t+1)$$

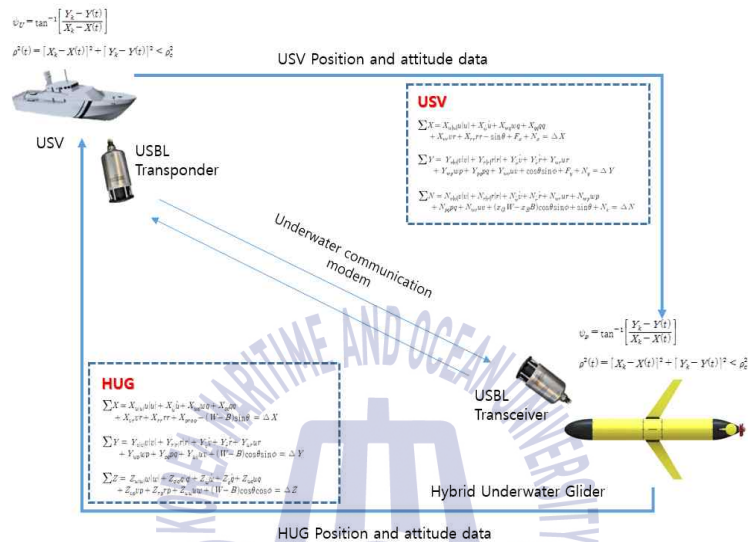


Fig 5.4 leader-follower navigation system diagram of hybrid underwater glider and Unmanned Surface Vehicle

Fig 5.4는 협력제어 시스템의 모식도로 각각의 항법 및 동적 운동 방정식 그리고 협력제어 시스템의 구성요소를 나타낸 그림이다.

위 그림과 같이 하이브리드 수중 글라이더와 무인 수상선의 위치를 공유하기 위해 소형 USBL과 수중통신 모뎀이 필수적이다.

본 연구의 협력제어 시스템은 USBL과 수중통신 모뎀의 수신율에 따라 성능 결과에 큰 영향을 미치므로 각각의 플랫폼의 특성을 파악하여 알고리즘을 설계 하여야 한다. 따라서 위치의 원활한 공유 및 통신의 원활함을 위해 하이브리드 수중글라이더의 특수한 움직임인 추진체를 이용한 수평 주행을 하여 협력항법을 실시한다.

5.2.3 협력제어 시스템의 제어 시뮬레이션 결과

앞서 설명하였던 하이브리드 수중글라이더의 항법 시스템과 무인수상선의 항법 시스템 그리고 협력제어 시스템을 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

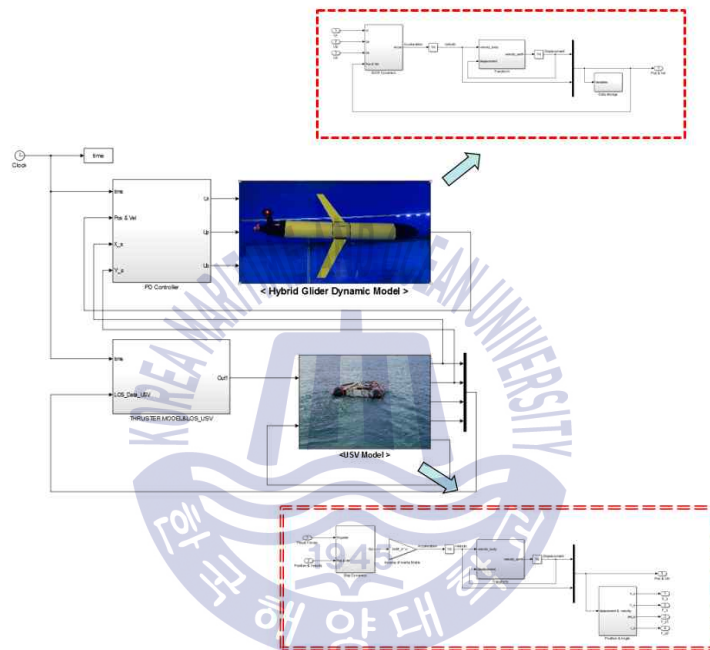


Fig. 5.5 Simulator of Hybrid underwater glider & Unmanned Surface Vehicle
leader-follower navigation

Fig. 5.5에서 네모 점선으로 표현된 부분은 하이브리드 수중글라이더의 6자유도 운동방정식 및 항법 알고리즘 부분이며 네모 이중 점선으로 표시한 부분은 무인수상선의 3자유도 운동 방정식 및 항법 알고리즘을 표현한 시뮬레이션이다.

위 시뮬레이션을 바탕으로 우선 신경망-PID 병렬 제어기를 사용한 협력제어 시스템의 성능을 검증하기 위해 단순 PID 제어기와 신경망-PID 병렬 제어기를

비교하였다.(Youngjin Choi and Wan Kyun Chung, 2004)

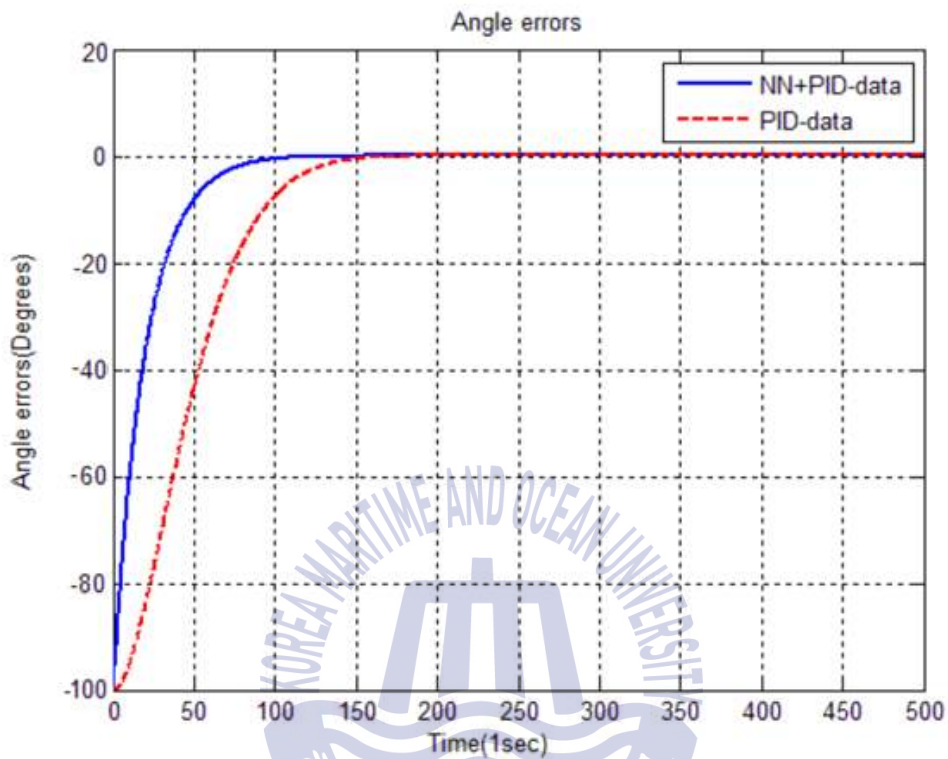


Fig. 5.6 Heading angle error between two moving bodies due to leader-follower navigation

무인 수상선은 움직이는 표적이 되어 하이브리드 수중글라이더가 실시간으로 무인 수상선에 접근하기 위해 진행 방향을 재조정하고 일정수심을 유지하며 추진체로 이동하며 이를 Fig 5.6의 그래프에 나타냈다. 그래프의 결과로 단순 PID 제어기보다 신경망-PID 병렬 제어기의 Angle 제어 응답 성능이 약 30% 정도 빠른 결과를 나타냈다.

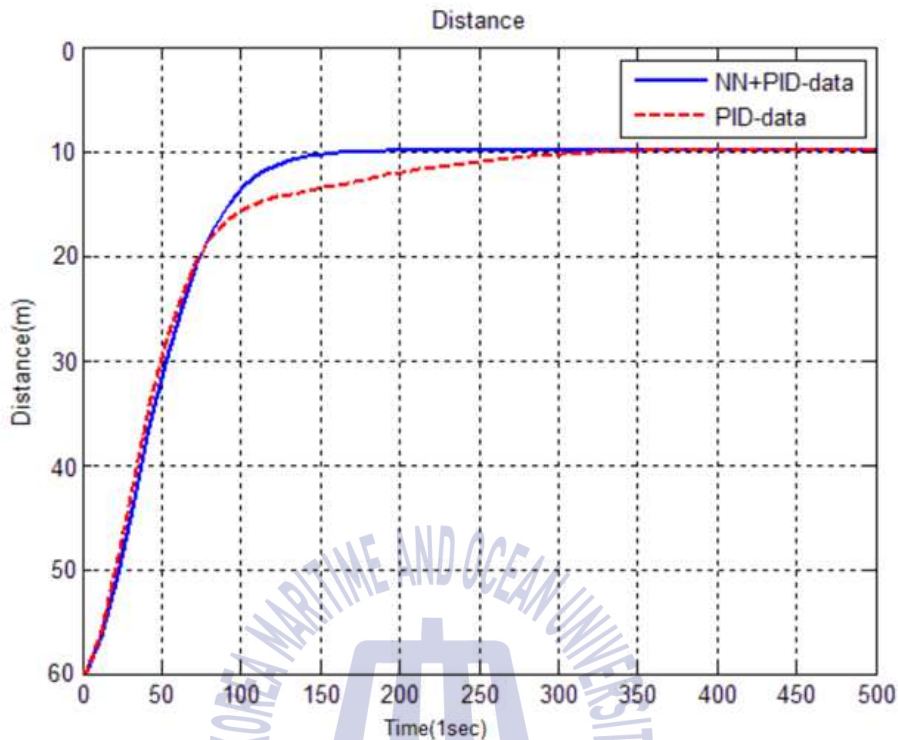


Fig. 5.7 Position error between two moving bodies due to leader-follower navigation

추진체를 이용해 수평 이동을 하는 이유는 sinwave 형태로 기동하면 하이브리드 수중글라이더의 방향 제어성능이 떨어지며 수심이 실시간으로 변화하기 때문에 USBL의 위치 데이터 수신에 불안정하다. 또한, 무인 수상선을 추적할 때 최악의 경우 무인수상선과 부딪힐 우려도 있다. 따라서 하이브리드 수중글라이더는 추진체를 이용하여 무인수상선에 접근한다.

무인 수상선은 해상에 떠서 운항하는 운동체로서 하이브리드 수중글라이더가 접근 시 Z 방향으로 일정 거리만 유지하면 두 운동체가 부딪칠 우려는 사라진다. 따라서 Z 방향으로 이동할 수 없는 무인 수상선에 관해 하이브리드 수중글라이더의 Z 방향은 $Z = constant$ 로 두는 것이 타당하고 Fig 5.7은 하이브리드 수중글라이더와 무인 수상선의 위치를 일정하게 유지하며 항행하는 협력제어 시스템의 위치 그래프로써 무인 수상선과 하이브리드 수중글라이더가 10m의 거리

를 두고 함께 항행할 때 일정 거리를 제어하는 결과 그래프이다. 위 그래프 결과 위치를 제어 응답 성능이 단순 PID 제어기보다 약 50% 이상 빠르고 안정적인 성능을 나타냈다.

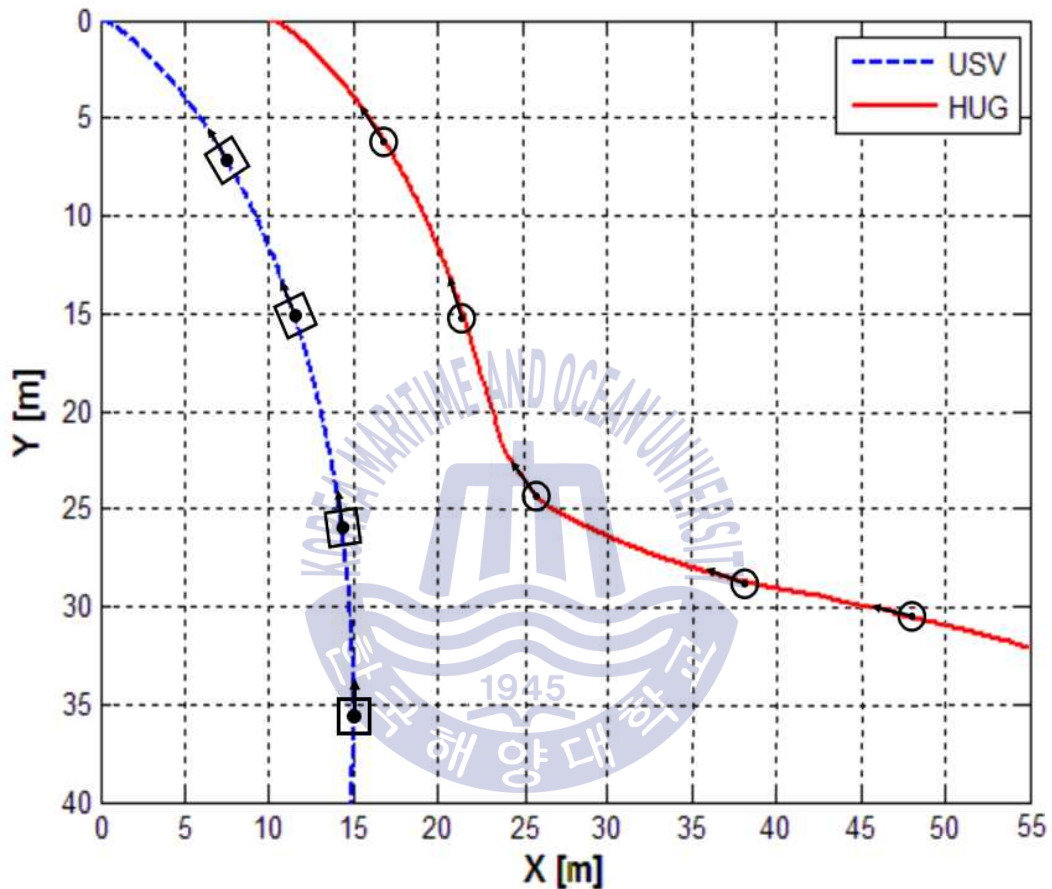


Fig. 5.8 leader-follower navigation results of hybrid underwater glider and Unmanned Surface Vehicle

Fig 5.8의 그래프는 Fig. 5.6과 Fig. 5.7의 결과를 바탕으로 최종적인 협력항법 시스템의 결과이다. 그래프에 나타난 것과 같이 하이브리드 수중글라이더는 무인 수상선과 10m의 거리를 유지하며 같은 방향으로 안정적으로 이동한다.

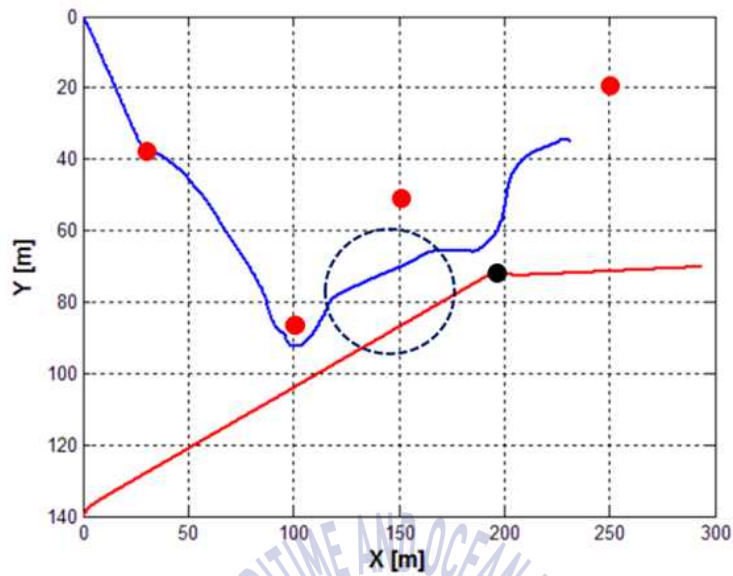


Fig 5.9 Simulation results of position and leader-follower navigation system of two systems(a)

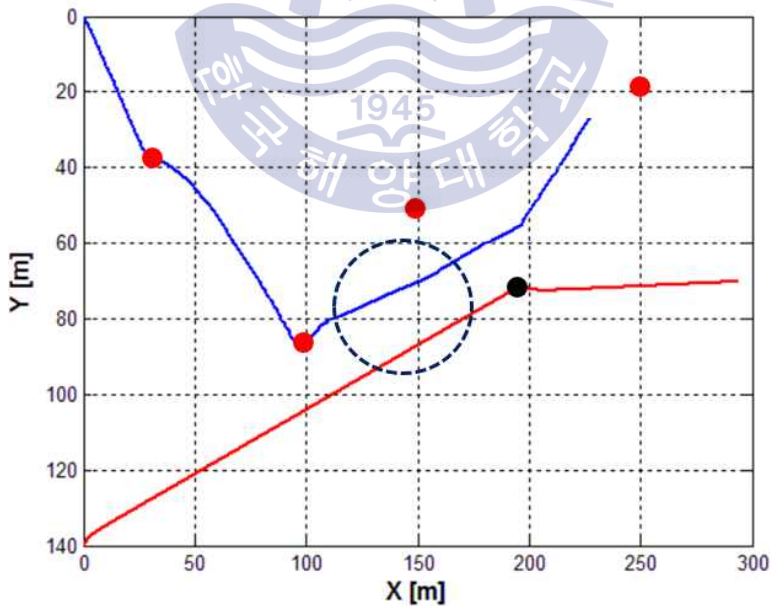


Fig 5.9 Simulation results of position and leader-follower navigation system of two systems(a)(b)

Fig. 5.9의 그래프는 하이브리드 수중글라이더와 무인 수상선 각각의 항법 미션 수행 및 협력제어 시스템 시뮬레이션 결과이며 파란색 선은 하이브리드 수중글라이더의 이동궤적이며 붉은색 선은 무인 수상선의 이동궤적이다. 또한, 그래프 상의 붉은 점은 하이브리드 수중글라이더가 독립적인 임무를 수행하기 위해 이동해야 할 목표 지점들이며 검은색 점은 무인수상선이 이동해야 할 목표 위치이다.

그래프를 분석해 보면 하이브리드 수중글라이더는 목표 지점들을 경유하며 이동 중 무인 수상선과의 협력시스템을 통해 일정 거리를 유지하며 무인수상선을 추적하고 있으며 일정 조건이 충족되면 하이브리드 수중글라이더는 다시 자신의 임무인 목표 지점을 향해 출발한다. 협력제어 시스템의 제어를 받는 부분은 Fig. 5.9의 그래프에 둥근 점선으로 표시하였다. 또한, Fig. 5.9(a)는 단순 PID 제어 알고리즘을 이용한 항법 및 협력제어 결과이며 Fig. 5.9(b)는 신경망-PID 병렬 제어 알고리즘을 이용한 항법 및 협력제어 결과이다. 협력제어가 완료된 후 추진체의 변화, 즉 추진체를 이용하던 추진방식에서 부력엔진으로 교체되는 시점에 단순 PID 제어기를 이용한 제어 결과는 신경망-PID 병렬 제어알고리즘보다 안정적이지 못하고 불필요한 움직임 또한 커진다.

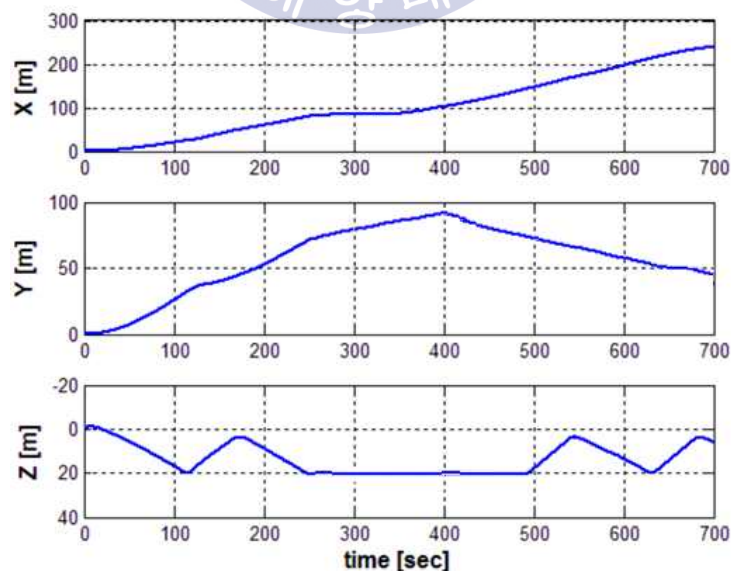


Fig 5.10 Dynamic behavior of Hybrid underwater glider (follower)

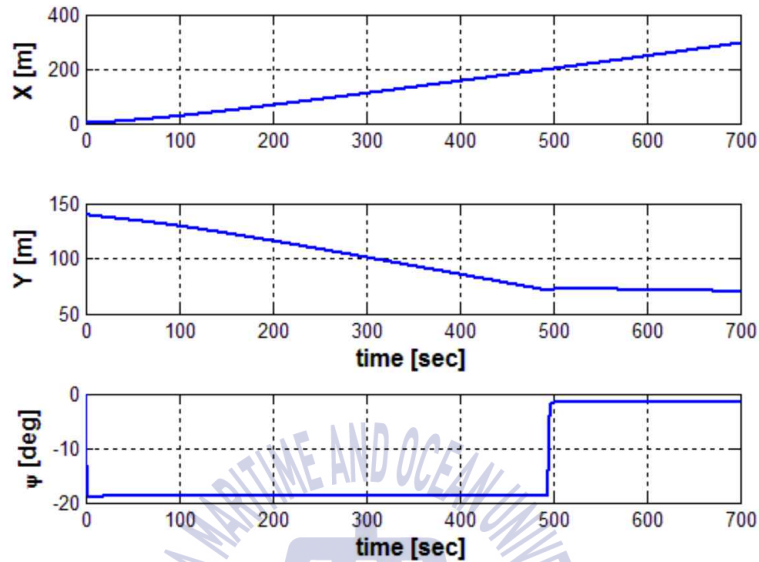


Fig 5.11 Dynamic behavior of Unmanned Surface Vehicle(leader)

Fig 5.10~Fig 5.11은 협력제어 항행 중 하이브리드 수중글라이더와 무인 수상선의 동적 거동을 각각 나타낸 그래프이다. Fig. 5.10의 3번째 z위치를 나타낸 그래프에서 sinwave로 이동을 하다 협업항법 시스템으로 진행 시 하이브리드 수중글라이더의 추진체를 이용하여 일정 수심을 유지하며 수평으로 기동하였다.

제6장 결론

본 연구에서는 하이브리드 수중 글라이더의 항법 시스템설계 및 수상선과의 협력제어를 통해 수중항법이 한계를 극복할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 수중과 수상 두 항법 시스템을 하나로 연결하기 위해 수중통신 모델을 사용하여 유기적으로 정보를 공유할 수 있는 시스템을 설계하였고 이를 구현하기 위해 항법에서 가장 정확한 위치 정보를 제공하는 GPS 데이터를 수중으로 전송할 수 있도록 하이브리드 수중글라이더의 기존에 글라이더 항법 시스템을 탈피하여 협력 항법 시스템에 관해 연구한다. 협력제어 항법 시스템은 하이브리드 수중 글라이더와 무인 수상선의 위치를 공유하여 두 운동체 간의 일정 거리 및 각도를 유지하며 항행하기 위해 각 시스템의 항법 시스템을 설계하였고 각각의 항법을 하나의 협력제어 항법 시스템으로 연결해주는 알고리즘을 신경망-PID 병렬제어기를 이용하여 설계하였다.

협력제어 항법 시스템을 설계하기 위해 하이브리드 수중글라이더의 항법을 구현하였고 하이브리드 수중글라이더의 항법 중 가장 중요한 Heading Angle을 정확하게 측정하기 위해 ARS(Attitude Reference System)를 Ring laser gyroscope와 지자기 센서를 확장 칼만 필터로 융합하여 설계하였다. ARS의 가장 큰 문제점인 시간에 따른 누적오차를 효과적으로 감소시켰고 자이로 데이터, 가속도 데이터 및 지자기 데이터의 수렴을 통한 방위의 적분 오차 제거이론을 연구하고 실험적으로 구현하였다 항법은 3자유도 운동 방정식과 유체력 계수 그리고 GPS(Global Positioning System)를 이용하여 설계하였다.

설계된 각각의 항법을 MATLAB/Simulink를 활용하여 타당성을 검증하였고 두 시스템을 이용하여 협력제어시스템을 설계하였다.

협력제어 항법 시스템은 USBL의 데이터를 기반으로 수중통신 모뎀을 이용하여 하이브리드 수중글라이더와 수상선을 위치를 유기적으로 제어할 수 있고 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.



참고문헌

1. 김기훈, 2005. 무인잠수정 SNUUV I의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석. 박사학위 논문. 서울;서울대학교
2. 김동희 등, 2014. 이동질량장치와 부력엔진을 포함한 무인 수중글라이더의 동역학 모델링 및 운동성능 해석. 한국해양공학회지, 28(5), 466-473.
3. 김용백 등, 2014, 신경망 PID 제어기를 이용한 이동로봇의 군집제어, 한국정보통신학회지, Vol.18 No.8 pp1811~1817.
4. 박요섭 등, 2012. 수중 글라이더를 이용한 동해 횡단 사례 보고. 한국해양학회지, 17(2), pp.130-137.
5. 박종진, 2013. 해양 글라이더에 관하여 한국 근해에서의 적용 가능성. Ocean and Polar Research, 35(2), pp.107-121.
6. 신동협, 배서룡, 백운경, & 주문갑, 2013. 퍼지 PD 제어기를 사용한 자율 무인 잠수정의 경유점 추적. 한국정보기술학회논문지, 11(5), pp.1-7.
7. 정상기 등, 2015. 고속 무인 수중글라이더의 설계 및 제어 연구. 2015년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
8. 정상기 등, 2016. Design and Control of High Speed Unmanned Underwater Glider. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol.3, No. 3, pp273~279
9. Asgeir J. Sorensen, 2011, A Surver of Dynamic Positioning Control Systems, Annual Reviews in Control, 35(1), pp.123~136
10. Bhatta, P. and Leonard, N. E., "Nonlinear gliding stability and control for vehicles with hydrodynamic forcing," Automatica, Vol. 44, No.5,1240-1250, 2008.
11. Carlos Canudas de wit, Ernesto Olguin Diaz and Michel Perrier, 2000,Nonlinear Control of an Undewater Vehicle/ Manipulater with Composite Dynamics, IEEE Transaction on

- control Systems Technology, 8(6), pp.948~960.
12. Christian De Wit, 2009, Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships, M.s Dissertation, Delft, Delft university of Technology.
 13. CG. Park, K. J. Kim, H. W. Park, J. G. Lee “스트랩다운 관성항법시스템의 초기 개략정렬 알고리즘 개발”, 제어로봇시스템학회 논문지, vol 4, pp 674-679, 1998
 14. D.F.Myring, 1976. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. Aeronautical Quarterly, 27(3), pp.186-194.
 15. Eriksen, C.C. et al., 2001, Seaglider: A Long Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26(4), pp.424-436. (Nam, et al., 2009)
 16. Fiorelli, E. et al., 2006. Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 31(4), pp.935-948.
 17. Gianluca Antonelli, 2010, Underwater Robots, Springer.
 18. Graver, J. and Leonard, N. E., “Underwater glider dynamics and control,” 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham, pp.1-14, 2001.
 19. H. U. Park, J. S. Jeong, “레이저 자이로 기반 관성항법장치와 위성항법장치의 강결합 방식 시스템 구현” J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(2), 134-141(2013)
 20. Isa, K. and Arshad, M. R., “Dynamic modeling and characteristics estimation for USM underwater glider,” Proceedings of the IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, Shah Alam, pp. 12-17, 2011.
 21. J. N. Lim, T. Y Kwon, C. W. Nam, J. C. Lee, C. J. Park, “레이저 자이로 기반의 고정밀 항법장치 SW개발”, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp 1322-1325, 2013.11
 22. John N. Newman, 1977. Marine Hydrodynamics. MIT Press, Masschusetts
 23. Joshua G. Graver, 2005. Underwater gliders: Dynamics, control and Design. Ph.D. Princeton university
 24. Jon Erling Gorset Refsnes, 2007, Nonlinear Model-Based Control of slender Body AUVs, Ph.D Dissertation, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology.

25. Kan, L., Zhang, Y., Fan, H., Yang, W., and Chen, Z., "MATLAB-based simulation of buoyancy-driven underwater glider motion," J. Ocean Univ. China (English ed.) Vol. 7, pp. 113-118, 2008.
26. Leonard, N.E. et al., 2010. Coordinated Control of an Underwater Glider Fleet in an Adaptive Ocean Sampling Field Experiment in Monterey Bay. Journal of Field Robotics, 27(6), pp.718-740.
27. Maybeck, P.S., 1996. Stochastic Models, Estimation, and Control: Vol.1. Academic Press Inc: New York.
28. Mark W. Spong, Seth Hutchinson and M. Vidyasager, 2006, Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, Inc.
29. Mahmoudian, N. and Woolsey, C., "Underwater glider motion control" Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, pp. 552-557, 2008.
30. Morton Gertler and Grant R. Hagen, 1967, Standard Equation of Motion for Submarine Simulations, Naval Ship Research and Development Center, report No.2510.
31. Martine A. Abkowitz, 1969, stability and Motion control of Ocean Vehicles, The MIT Press, Cambridge, USA.
32. N. E. Leonard and J. G. Graver, 2001. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Special Issue on Autonomous Ocean Sampling Networks, 26(4), pp.633-645.
33. Ola Harkegard and S. Torkel Glad, 2005, Resolving Actuator Redundancy-Optimal Control vs. Control Allocation, Automatica, 41(1), pp.137-144.
34. Robert D. Blevins, 1979. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Kreiger Publishing, Florida.
35. Rudnick, D. L., Davis, R. E., Eriksen, C. C., Fratantoni, D. M., and Perry, M. J., "Underwater Gliders for Ocean Research," Marine Technology Society Journal, Vol. 38, No. 1, pp.48-59.2004
36. S.G. Garg, L. D. Morrow and R. Mamen, "Strapdown navigation technology : a literature survey" Journal of Guidance and Control, vol 1, no. 3, pp.161-172, 1978

37. Seo, D.C., Jo, G.N., Choi, & H.S., 2008. Pitching Control Simulations of an Underwater Glider Using CFD Analysis. OCEANS 2008 – MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, pp.1–5.
38. Sherman, J, Davis, R.E., Owens, W.B., & Valdes, J. 2001, The Autonomous Underwater Glider "Spray". IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26(4), pp.437–446.
39. Smith, R.N. et al., 2011. Persistent Ocean Monitoring with Underwater Gliders: Adapting Sampling Resolution. Journal of Field Robotics, 28(5), pp.714–741.
40. Sighard F. Hoerner and Henry V. Borst, 1985. Fluid Dynamic Lift. Published by author, second edition.
41. Stommel, H., 1989. The Slocum mission. Oceanography, 2(1), pp.22–25.
42. Timothy Prestero, 2001. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Master. Massachusetts institute of technology
43. Thor I. Fossen, 1994, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons Ltd.
44. Thor I. Fossen, Tor Arne Johansen and Tristan Perez, 2008, A Survey of Control Allocation Methods for Underwater Vehicles, InTech.
45. Tristan Perez and Alejandro Donaire, 2009, Constrained Control Design for Dynamic Positioning of Marine Vehicles With Control Allocation, Modeling, Identification and Control, 30(2), pp.57–70.
46. Tran, Ngoc-Huy , Choi, H. S., Jae-Hyun Bae, J. H., and Oh, J. Y., and Cho, J. R., "Design, Control, and Implementation of a New AUV Platform with a Mass Shifter Mechanism", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 16, No. 7, pp. 1599–1608, 2015.
47. Webb, D.C., Simonetti, P.J., & Jones, C.P., 2001. SLOCUM, An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26(4), pp.447–452.
48. Yoshihiko Nakamura, 1991, Advanced Robotics: Redundancy and Optimization, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
49. Youngjin Choi and Wan Kyun Chung, 2004, PID Trajectory Tracking Control for

Mechanical systems, Springer.

50. Zhihua Qu, 1998, Robust control of Nonlinear Uncertain System, John Wiley & Sons, Inc.
51. Zhang, S., Yu, J., Zhang, A., and Zhang, F., "Spiraling motion of underwater gliders: Modeling, analysis, and experimental results", Ocean Engineering Vol. 60 pp. 1-13, 2013.

