



공학석사 학위논문

하이브리드 수중 글라이더의 제어 연구



A Study on Control for Hybrid Underwater Glider

2016년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과 지대형



한국해양대학교 대학원

2016년 1월 15일



본 논문을 지대형의 공학석사 학위논문으로 인준함.

목 차

List of Tables iv List of Figures vi Abstract

1. 서 론

 '				A NUMBER				
1.1	연구배경					•••••	•••••	1
1.2	하이브리	니드 수중	- 글라이더	동작 개	념	4	•••••	4
1.3	연구목적	÷]	8			G	•••••	6
						<		

2. 하이브리드 수중 글라이더의 기구부

2.1	선체 구조	7
2.2	기구부 구조	8
	2.2.1 부력엔진	9
	2.2.2 자세제어기	11
	2.2.3 추진기 및 러더	13

3. 제어시스템 설계

3.1	제어시스템 구성	15
3.2	자율제어시스템	16
3.3	액추에이터 제어시스템	17
	3.3.1 부력엔진 제어시스템	20
	3.3.2 자세제어기 제어시스템	22
	3.3.3 추진기 및 러더 제어시스템	24



3.4 센서 시스템	26
3.4.1 DVL	27
3.4.2 AHRS	28
3.4.3 수심 측정기	29
3.4.4 측심기	30
3.4.5 GPS	31
3.4.6 누수 센서	32
3.5 배터리 및 전원 회로	33

4. 제어 알고리즘 연구

4.1 동역학 모델링	 37
4.2 제어 알고리즘	42
4.3 항법 알고리즘	43
. 성능 시험	

5. 성능 시험

5.1 DVL 성능 시험				••••••	46
5.2 GPS 성능 시험	FOU				48
5.3 항법 알고리즘 /	성능 시험	1945			49
5.4 자세제어기 및 내	부력엔진 시	성능 시험			50
5.5 자세 제어 시험	•••••		•••••		51

6. 결론

6.1 결론 및 향후과제	54
감사의 글	55
참고문헌	56
부록	58



List of Tables

Table	1 3	Specification o	of l	Inderwater Glider	2
Table	2 3	Specification o	of H	Iybrid Underwater Glider	3
Table	3]	Dimensions of	ΗU	JG ·····	8
Table	4 3	Specification o	of E	Buoyancy engine	10
Table	5 3	Specification o	of N	Notor(200Watt 36V DC Type)	10
Table	6 3	Specification o	of A	ttitude controller	12
Table	7 3	Specification o	of N	Notor(11Watt 36V DC Type)	12
Table	8 3	Specification o	of 7	Thruster	14
Table	9 3	Specification o	of I	ntel Edison	16
Table	10	Specification	of	Core407V ·····	18
Table	11	Specification	of	Attitude control board	19
Table	12	Specification	of	CUBE-DC3606-DID ·····	20
Table	13	Specification	of	Buoyancy engine	21
Table	14	Specification	of	CUBE-DC3601-DII ·····	22
Table	15	Specification	of	Attitude controller	23
Table	16	Specification	of	Servo motor	25
Table	17	Specification	of	Rudder	25
Table	18	Specification	of	DVL ·····	27
Table	19	Specification	of	AHRS ·····	29
Table	20	Specification	of	Depth sensor	30
Table	21	Specification	of	Altimeter	31
Table	22	Specification	of	GPS ·····	32
Table	23	Specification	of	Water leak sensor	33
Table	24	Specification	of	Battery cell	34



Table	25	Specification of DC-DC Converter	36
Table	26	6 D.O.F motion of the underwater vehicle	38
Table	27	Parameters of control algorithm for HUG	42





List of Figures

Fig.	1	Vertical driving	4
Fi g .	2]	Horizontal driving	5
Fig.	3]	Hybrid gliding	5
Fig.	4	Appearance of HUG	7
Fig.	5 (Cross section of HUG	8
Fig.	6 I	Design of Buoyancy engine	9
Fig.	7]	Buoyancy engine	9
Fig.	8]	Design of Attitude controller	11
Fig.	9	Attitude controller	11
Fig.	10	Thruster and Rudder	13
Fig.	11	Thruster	13
Fig.	12	Block diagram of HUG	15
Fig.	13	Block diagram of Autonomous board	16
Fig.	14	Block diagram of Attitude control board	17
Fi g.	15	Core407V (STM32F407V)	18
Fi g .	16	Motor drive of Buoyancy engine	20
Fi g .	17	Controlled variable of Buoyancy engine	21
Fig.	18	Motor drive of Attitude controller	22
Fig.	19	Controlled variable of Attitude controller	23
Fig.	20	Rudder of HUG(L) / Servo motor of Rudder(R)	24
Fig.	21	Sensor arrangement of HUG	26
Fig.	22	NavQuest600 Micro DVL	27
Fi g .	23	AHRS	28
Fig.	24	Depth sensor	29



Fig.	25	Altimeter	30
Fig.	26	U-BLOX NEO-6M Module	32
Fig.	27	Water leak sensor	33
Fig.	28	24V 360W Battery pack (1P 8S)	34
Fig.	29	36V 540W Battery pack (1P 12S)	34
Fig.	30	Block diagram of Power board	35
Fig.	31	Earth fixed and body fixed coordinate system	37
Fig.	32	Control algorithm diagram of HUG	42
Fig.	33	Algorithm of EKF	44
Fig.	34	Navigation system	45
Fig.	35	Test-bed of DVL	46
Fig.	36	X-axis velocity test of DVL	47
Fig.	37	Y-axis velocity test of DVL	47
Fig.	38	Error of GPS ·····	48
Fig.	39	Result of Navigation algorithm	49
Fig.	40	Result of Controller test	50
Fig.	41	Performance test of Buoyancy engine #1	51
Fig.	42	Performance test of Buoyancy engine #2	51
Fig.	43	Pitch test of Glider #1	52
Fig.	44	Pitch test of Glider #2	52
Fig.	45	Pitch control test using PD controller #1	53
Fig.	46	Pitch control test using PD controller #2	53



A Study on Control for Hybrid Underwater Glider

Ji, Dae Hyeung

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

Abstract

In this paper, the control of the Hybrid underwater glider (HUG), which has the advantage of high precision route search function and long-term mission capability was studied. The whole control hardware system of the HUG were constructed including a control algorithm. The whole control hardware system is composed of a the control system, the autonomous control system, and the actuator control system. The control system was designed for the smooth and precise path tracking of the HUG using the Linux operating system which is based on single board computer Edison. In addition, the actuator control system was designed to control the propeller, thrusters, buoyancy engine, and the rudder using the STM32F407V microcontroller. Also, PID control algorithm was designed for the navigation system. In order to verify the performance of the developed control system, the navigation system, and the developed algorithm, a number of various experiments were performed and good performance of the developed system was shown through results.

KEY WORDS: Hybrid underwater glider 하이브리드 수중 글라이더; Extend Kalman Filter 확장 칼만 필터; DVL 도플러 속도계; Navigation system 항법 시스템.





제1장 서론

1.1 연구배경

Collection

최근 전세계가 에너지 부족 문제에 직면하여 한정적인 자원을 사용함에 있어서 해양 자원 을 발굴하는 것이 주요 이슈가 되고 있다.(신동협 등, 2013) 바다는 무한한 광물, 에너지, 공 간 등의 자원을 보유하고 있지만 사람들은 그것의 극히 일부분만을 활용하고 있으며 대부분 은 오랜 세월동안 사용하지 못하고 있다. 해양은 사람이 접근하기에는 위험한 극한의 요소 가 많기 때문에 직접적인 해양 탐사를 위해서는 무인 해양탐사 로봇의 운용이 필수적이다.

대표적인 무인 해양탐사 로봇으로 AUV(Autonomous underwater vehicle)가 잘 알려져 있 다. AUV는 운용자의 개입이 최소화되어 스스로 자율운항이 가능하여 군사적, 학술적 연구 에 사용되는 제어시스템이다. AUV는 해양환경의 다양한 정보를 수집하거나 감시, 정찰활동 등의 중요한 임무를 수행하며 특히 사람이 접근하기 어려운 심해 탐사에 활용이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 프로펠러를 사용하여 추진력을 생성하므로 선체의 무게가 무겁고 부피 가 크다는 단점이 있다. 또한 추진동력을 생성하기 위한 에너지의 저장량이 배터리의 용량 에 의해 한정되어 있으므로 장시간 탐사에 불리하다는 단점이 있다. 한편 수중 글라이더 (Underwater glider)는 바다의 심총과 표충을 오가면서 원하는 지점으로 이동할 수 있도록 고안된 무인 해양탐사 로봇으로서 역할은 AUV와 크게 다르지 않지만 프로펠러 추진방식을 사용하는 AUV와는 달리 별도의 추진체를 사용하지 않기 때문에 에너지 측면에 있어서 AUV 보다 효율적이다.(박종진 등, 2013) 수중 글라이더의 추진력은 유체의 유입과 배출에 의한 부력 조절과 내부의 질량 이동과 날개의 움직임을 이용한 모멘트 변화에 의해 발생된다. 따 라서 동력 에너지의 사용이 비교적 적기 때문에 장시간, 장거리의 해양 탐사에 적합하다.(박 종진 등, 2013; 박요섭 등, 2012)

Table 1과 같이 해외에서는 Slocum glider, Spray glider, Sea glider, X-Ray와 같은 다양한 형태의 수중 글라이더를 개발하였다.(Eriksen et al., 2001; Sherman et al., 2001; Webb et al., 2001) 이러한 플랫폼에 여러 가지 음향장비 및 센서를 장착하여 넓은 범위의 해저 지형 또는 해양 환경 자료를 수집하거나, 대서양 횡단 실험을 수행하는 등 해양생태학 및 해양환 경학에 운용할 수 있는 실해역 실험들을 수행하고 있다.(Fiorelli et al., 2006; Leonard et al., 2010; Rudnick et al., 2004; Smith et al., 2011)



Model	Specification
	Slocum Glider /Teledyne Webb Research(미국) • Thermal engine/electric glider 두 버전 • Thermal glider: 최대깊이 2,000m, 5년간 40,000km • Electric glider: 15~30일, 600~1,500km • 미 해군의 연안전장 센싱 프로그램의 일부로서의 해양 센싱 역할
1 des alle	Spray Glider / Bluefin Robotics(미국)
	 2m(L), wing span 1.2m, 52kg 두 개의 부낭 사이에서 광유를 펌핑하여 수중을 수직 및 수평으로 사전에 설정된 경로 항주 소형 보트에서 진수 및 회수 가능
	Sea Glider / iRobot(미국)
	 장거리, 장기체류 프로파일링 글라이더 AUV 0.5knot로 6개월까지 해양 모니터링 1.8m(L)×0.3m(d), 52kg 운용수심: ~1,000m ONR PLUSNet project로 개발
	Liberade XRAY
	 /Scripps Inst. of Oceanography(미국) 세계에서 가장 큰 수중 글라이더 PLUSNet의 이동 노드의 한 부분 내장된 에너지원에 의한 광범위한 해양 모니터링 표준해양센서 탑재, 순항속도: 1 ~ 3knot 작전반경: 1,200 ~ 1,500km 운용기간: 6개월
	고속 무인 수중글라이더 / Kiost(한국)
	• 국내 최초 수중글라이더 • 2.5knot 주행속도 • 2m(L)×0.2m(d), 58kg • 운용수심: ~200m

Table 1 Specification of Underwater Glider



이러한 수중 글라이더는 학문적인 연구뿐만 아니라 수중통신 및 위성통신을 이용한 잠수 함 등의 통신게이트웨이로서 활용하는 등 군사용으로도 매우 중요한 활용도를 보이고 있기 때문에, 수중 글라이더 분야에 대한 연구를 활성화함으로써 국가적으로 경쟁력을 높일 필요 가 있다. 반면 국내에서는 극소수의 연구 결과를 제외하고 수중 글라이더에 대해 진행된 연 구는 거의 전무하다고 할 수 있다.(Seo et al., 2008) 하지만 2014년 Kiost는 무인 수중글라이 더의 운동제어기술과 자율운항제어기술에 관한 연구를 진행하였으며, 이를 검증할 시제를 제작하여 수조 시험 및 해상 시험을 성공적으로 진행하였다.(정상기 등, 2015)

최근에는 미국과 중국에서 Table 2와 같은 하이브리드 수중 글라이더(Hybrid underwater glider, HUG)라는 더욱 진보된 무인 해양탐사 로봇을 개발하였다. 이것은 기존 수중 글라이 더에 비해 해류의 흐름이나 수면의 바람과 같은 외력의 영향을 적게 받으며, 목표해역 도달 성능 향상을 위해 기존의 부력제어 추진방식과 외부 추진기를 이용한 추진방식을 결합하였 다. 그리하여 수중 글라이더의 에너지 절감의 장점과 자체 추진을 통한 제어성능의 병합으 로 활용방안이 확대되었으며, 정밀 경로 탐색이 가능하며 목표물 접근, 조류 대응, 수중 회 수 등이 기존 수중 글라이더에 비해 쉬워졌다.

Model	Specification
	Slocum G2 /Teledyne Webb Research(미국)
	 1.5m(L)×0.22m(d), 54kg 운용수심: 30 ~ 1000m 작전반경: 600 ~ 1500km 운용기간: 25 ~ 365일
	Haiyan / Tianjin University(중국)
	 1.8m(L)×0.3m(d), 70kg 운용수심: 1500m 작전반경: 1000km 운용기간: 30일

Table 2 Specification of Hybrid Underwater Glider



1.2 하이브리드 수중 글라이더 동작 개념

일반적으로 수중 글라이더의 주행은 수직 운동과 수평 운동으로 나누어 설명할 수 있는 데, 수직운동은 추진력을 발생시키기 위한 운동이다. Fig. 1은 수중 글라이더의 수직 주행을 그림으로 나타낸 것이다. 수중 글라이더는 수심 상한과 하한 사이를 상승과 하강을 반복하 여 추진력을 얻는다. 하강 시에는 부피를 감소하여 부력을 감소시켜 추진하며, 수직 자세를 제어하여 받음각(Attack angle)을 최적화되도록 주행한다. 즉 종동요각(Pitch)을 제어하는 것 이다. 수중 글라이더의 수심이 하한에 도달하면 다시 수중 글라이더는 부피를 증가시켜 부 력을 증가시킨 힘을 이용하여 추진하며, 이와 동시에 수직 자세를 제어하여 받음각을 최적 화되도록 주행한다.

이러한 하강과 상승을 반복하여 전진하며, 정점을 향해 주행하도록 러더를 회전하고 배티 리팩의 위치를 조절하여 무게 중심을 이동시켜 목표된 정점을 향해 추진하도록 선수방향을 조절한다. 목표점에 도달하거나 통신주기에 도달하였을 때 통신모드로 전환하여 수표면에 부상한다. 이를 반복하여 주어진 미션을 수행한다. 주행 중 수중 글라이더는 수중 측심기로 해저면과의 거리를 측정하며 선체가 하강 시에 미리 설정된 하한 거리 값보다 해저면까지의 거리가 짧을 경우 해저면 충돌 방지를 위해 깊이 방향으로 이동하지 않고 상승하도록 제어 한다.



Fig. 1 Vertical driving



Fig. 2는 수중 글라이더의 수평 주행을 그림으로 나타낸 것이다. 수평 주행은 연속된 정점 을 순차적으로 추종하는 방식을 사용하며 현재 목표된 정점을 향해 선수동요각(Yaw)을 제 어하여 추종한다. 목표지점이나 경유점에 부상하도록 설정하고 부상 후에 현 정보를 바탕으 로 목표지점이나 경유점의 일정 반경 내에 도달하지 못하면 선수동요각을 제어한 후에 잠수 하여 다음의 원하는 목표반경 내에 도달하도록 제어한다.



Fig. 3 Hybrid gliding



이러한 수직/수평 주행은 일반적인 수중 글라이더의 주행이며, Fig. 3은 하이브리드 수중 글라이더의 주행을 그림으로 나타낸 것이다. 하이브리드 수중 글라이더는 수직/수평 주행을 수행하는 도중에 선택적으로 추진기를 이용하여 주행하는 것이 가능하다. 이러한 특징을 이 용하여 수직 주행 시에는 선체 상/하의 장애물을 피해 일정 수심에서 주행하는 것이 가능 하며, 수평 주행 시에는 강한 조류를 극복하거나 목표 해역에서 벗어났을 시 일반 주행보다 빠르게 주행 경로를 변경하여 기존의 경로로 돌아올 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 본 연구에서는 하이브리드 수중 글라이더의 Payload에 DVL을 장착하여 선체의 속도 성분을 보정해주어 기존의 수중 글라이더에 비해 더욱 정밀한 경로 제어가 가능하다.

1.3 연구목적

본 논문에서는 일반적인 수중 글라이더에 추진기를 추가하여 선택적으로 자항이 가능하도 록 설계된 하이브리드 수중 글라이더의 글라이딩 운동 및 추진기를 사용한 자항운도의 원활 한 동작 및 경로 제어를 위한 제어시스템을 설계 제작하고 이를 적용하여 개발한 제어시스 템의 제어성능을 수중 실험을 통하여 검증하고자 한다.

상기와 같은 연구 목적을 위해 본 연구에서는 하이브리드 수중 글라이더의 동역학 모델링 을 수립하고, 수중에서 주어진 경로 주행 및 임무를 수행하기 위해 AHRS와 DVL, GPS 센서 를 융합하는 복합 항법시스템을 구성하며, 수심 측정기의 유기적인 상호 작용을 통한 수심 제어 및 자세제어를 연구하여 강인한 수중 자세 제어 알고리즘 연구 및 제어 시스템의 연구 를 수행한다. 개발한 제어시스템에 항법 및 주행 알고리즘을 적용하여 운동 및 주행 시험을 진행하고 이의 성능을 검증한다. 하이브리드 수중 글라이더는 기존 수중 글라이더의 장시간 의 운용의 장점에 AUV의 고속 및 정밀 주행의 장점이 결합되어 주행성능과 목표 지점의 도 달 신뢰성을 향상할 것으로 기대한다.



- 6 -

제 2 장 하이브리드 수중 글라이더의 기구부

2.1 선체 구조

Fig. 4는 설계된 HUG의 외형도이다. HUG는 수심 200m급을 목표로 선체는 외경 220mm의 토피도(Torpedo) 선형을 가지며, 총 길이는 1970mm로 설계되었다. 양쪽 주날개의 외곽 끝점 간의 길이는 1040m, 러더 끝점에서 안테나 끝점 간의 길이는 580mm, HUG의 총 중량은 약 50.5kgf, 부력량은 약 50.6kgf로 설계되어져, 약 0.1kgf의 양성부력을 가지고 있다. 또한 선미 중앙에는 추진기가 장착되어 있다. Table 3은 설계된 HUG의 수치 정보를 정리한 표이다.



Fig. 4 Appearance of HUG



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

Table 3 Dimensions of HUG

50.60

kgf

2.2 기구부 구조

Buoyancy

Fig. 5는 HUG의 내부 구조를 나타내는 단면도로 선수부, 동체부 및 선미부로 구성되어 있 으며, 동체부 선수 방향에 부력엔진과 자세제어기, 동체부 선미 방향에는 자율제어보드 및 기타 내장품을 탑재하였으며, 동체부 가운데에는 추가 탑재 공간(Payload)를 가지며 외관에 주날개를 장착한다. 유체력에 영향력을 줄이기 위하여 앞단에 타원형태의 노즈콘(Nose cone)과 후면에 카울링(Cowling)을 장착한다. 노즈콘과 카울링 안쪽(Wet area)에는 해수가 유입되는 구조를 가진다. 카울링의 상단에는 통신을 위한 안테나, 하단에는 선수동요각을 제어하기 위한 러더, 후면에는 자체적인 추진을 위한 추진기로 구성된다.



Fig. 5 Cross section of HUG



2.2.1 부력엔진

수중 글라이더가 수중에서 수직 주행 즉, 상/하향 활강할 수 있는 에너지는 중력과 부력 의 차이로 발생시킨다. 일정한 체적을 유지한 부력상태에서는 임의의 질량체를 추가하여 중 력의 영향을 크게 만들어서 가라앉을 수 있고, 해당 질량을 제거하였을 때는 상대적인 부력 의 증가로 다시 수면으로 떠오르게 된다. 반복적인 활강을 필요로 하는 수중 글라이더의 경 우에는 일정한 중력이 작용하는 상태에서 부력을 조절 할 수 있는 구동기가 필요하다.

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



Fig. 6 Design of Buoyancy engine



Fig. 7 Buoyancy engine

제작된 부력엔진은 Fig. 7이며, 제원은 Table 4와 같다.

Index	Value
Discharge Pressure	$20.00 kgf/cm^2$
Control Volume	0.95kgf ($ ho = 1000 kg/m^3$)
Discharging Time	10sec
Driven Motor	200W 36V DC Type

Table 4 Specification of Buoyancy engine

Table 5는 부력엔진의 피스톨의 위치를 움직이는데 사용된 200Watt 36V DC Type모터의 제원이다.



Table 5 Specification of	Motor(200Watt	36V DC	Type)
--------------------------	---------------	--------	-------

Index 💦 🔲	Specification
Motor 😸	Maxon RE-50 270355
Gear	Maxon GP52C 65:1 223091
Encoder	Maxon HEDS 5540 110517
Nominal supply voltage 19	45 36V
No load speed	5680rpm
No load current	147mA
Nominal speed	5420rpm
Nominal torque	418mNm
Nominal current	7.07A
Stall torque	8920mNm
Starting current	148A
Max. efficiency	94%
Weight	1100g
Dimension	50(Ø)mm x 108mm



2.2.2 자세제어기

수중 글라이더는 내부의 질량을 이동시켜서 자세를 제어할 수 있다. 부력제어만으로 선체 의 Pitch를 변화시켜 활강할 수 있지만, 최적의 활강 경로 조정과 수중에서의 자세 안정화를 위해서는 추가적인 자유도를 제어할 구동기가 필요하게 된다. 글라이더는 Fig. 8과 같이 리 니어 모션 시스템을 통하여 선체 내부의 무게 질량을 이동시켜 Pitch를 제어하여 주행 시에 수심제어를 가능하도록 한다.

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



Fig. 8 Design of Attitude controller



Fig. 9 Attitude controller



제작된 자세제어기는 Fig. 9이며, 제원은 Table 6과 같다.

Index	Value
Movable Mass	4.75kgf
Stroke	0.2m
Moving Speed	0.006m/s
Driven Motor	11W 36V DC Type

Table 6 Specification of Attitude controller

Table 7은 자세제어기의 무게 질량의 위치를 움직이는데 사용된 11Watt 36V DC Type모 터의 제원이다.

Index	Specification
Motor	Maxon RE-max24 222055
Gear	Maxon GP22C 19:1 143976
Encoder	Maxon MR 201940
Nominal supply voltage	36V
No load speed	9090rpm
No load current	12.9mA
Nominal speed	7380rpm
Nominal torque	11.6mNm
Nominal current	0.324A
Stall torque	62.9mNm
Starting current	1.68A
Max. efficiency	83%
Weight	71g
Dimension	24(Ø)mm x 31.9mm

Table 7 Specification of Motor(11Watt 36V DC Type)



2.2.3 추진기 및 러더

선체의 선미인 카울링에는 추진기와 러더가 설계되었다. Fig. 10과 같이 추진기는 선체의 선미 중심에 위치되어 선체가 앞으로 나아갈 수 있는 자체 추력을 갖게 하며, 러더는 카울 링의 하단인 바닥을 바라보는 방향으로 위치되어 있다.

앞서 설명한 바와 같이 HUG에 복합 추진 방식을 적용하기 위해 자체적인 추진이 가능하 도록 추진기를 장착하였다. 추진기는 Fig. 11과 같으며 자체 제작한 300watt급 추진기를 사 용하였다. 설치된 추진기는 프로펠러 타입의 추진 방식을 사용하였다. 추진기는 Table 8과 같이 입력전압은 24V이며 모터드라이브가 내장되어 있는 구조이다. PWM 신호를 제어명령 으로 전진 방향 추력을 발생한다. 추진기의 용량은 최대 300watt이며 전진 추력은 약 4.2kgf 의 추력을 갖는다.



Fig. 10 Thruster and Rudder



Fig. 11 Thruster



Index	Specification
	24V 300W
Input	Power ground
	PWM signal
Output	Forward 4.2kgf
Weight	1.2kg (In air)
Dimension	54(\varnothing)mm \times 215mm
Depth Rating	200m

Table 8 Specification of Thruster

수중 글라이더에서 선수동요각을 제어하는 방식은 러더를 사용하는 방식과 선체 내부에 무게 질량을 회전하는 기구를 설치하여 제어하는 방식이 있다. 본 HUG에는 전자인 러더를 사용하는 방식을 채택하여 설계하였다. 후자의 경우 수중 주행 시에는 크게 문제가 되지 않 지만 수상 주행 시에는 Yaw를 제어하는데 문제가 된다. 본 수중 글라이더는 추진기를 사용 하는 하이브리드 수중 글라이더이기 때문에 임무 수행 중 상황에 따라 AUV와 같이 수상에 서 직선 및 회전 주행을 하여야 되는데 앞서 설명한 바와 같은 문제로 러더를 사용하는 방 식을 채택하였다.



제 3 장 제어시스템 설계

3.1 제어시스템 구성

본 논문에서는 HUG의 글라이딩과 추진기를 사용하여 경로 및 속도를 제어하고 원하는 동작을 수행할 수 있도록 제어시스템을 구성하였다. 구성한 HUG의 제어시스템의 하드웨어 구성도는 Fig. 12와 같다. 제어시스템은 크게 자율제어보드, 자세제어보드, 전원보드의 총 3 개로 구성하였다. 자율제어보드는 각종 센서들의 인터페이스와 자율운항제어를 위한 기능을 담당하고, 자세제어보드는 각 구동부의 위치 및 On/Off 제어를 수행하며, 전원보드는 배터 리와 DC-DC 변환기 등을 이용하여 제어보드에 적절한 전압의 전력을 공급하도록 구성하였 다. 위와 같이 파트를 나눈 것은 각 파트가 정해진 임무만을 수행하여 만일에 발생할 수 있 는 오류 사항을 줄이며, 추후 문제 발생 시 디번깅 및 수리가 용이하도록 나눈 것이다.



Fig. 12 Block diagram of HUG



3.2 자율제어시스템





Fig. 13은 자율제어시스템에 사용된 자율제어보드의 기능을 간략하게 나타낸 구성도이다. 자율제어시스템은 통신을 이용하여 AHRS, DVL, 수심 측정기, 측심기, GPS로부터 각각의 정 보를 받아 구성된 항법 및 주행 알고리즘을 이용하여 자세제어보드로 명령을 보내주는 역할 을 수행한다. 자율제어보드에 사용된 장비는 Intel사의 Edison 보드이며, Table 9는 외형과 제원이다.

1945Table 9 Specification of Intel Edison

Index	Specification
intel Edison What will you make?	CPU : Dual Core (Atom 500MHz + Qwak 100MHz) RAM : 1GB LPDDR3(2 × 32bit) COM : Wifi 2.4/5GHz 802.11a/b/g/n Bluetooth 4.0 Memory : 4GB eMMC I/O : SD, UART, SPI, GPIO, USB2.0 OTG OS : Yocto Linux V1.6 Dimension : 35.5 × 25 × 3.9mm

Edison보드는 Intel에서 만든 소형 하드웨어인 SBC(Single board computer)이다. Edison보드 는 마이크로 컨트롤러(MCU)가 아닌 OS 기반으로 동작되며 Linux OS로 구동된다. 하지만 마 이크로 컨트롤러와 같이 통신 및 I/O 인터페이스를 가지며, CPU의 처리 속도가 빠르고, 무 선통신인 Wifi와 Bluetooth가 추가 장비가 없이 가능한 장점을 가지고 있다.





3.3 액추에이터 제어시스템

Collection



Fig. 14 Block diagram of Attitude control board

Fig. 14는 액추에이터 제어시스템에 사용된 자세제어보드의 기능을 간략하게 나타낸 구성 도이다. 액추에이터 제어시스템은 자세제어기, 부력엔진, 러더, 추진기 총 4개의 기구 및 장 비를 제어한다. 이를 제어하기 위해서는 RS232, PWM, I/O Interrupt 기능을 갖는 마이크로 컨트롤러(MCU)를 사용하였다. 선정된 마이크로 컨트롤러는 비용대비 성능이 우수한 STMicroelectronics사의 Cortex-M 시리즈인 STM32F407V를 기반으로 제작된 Core407V 모듈 이며 이의 외형은 Fig. 15와 같다.

Cortex-M 시리즈에 대해 간단히 설명하면, Cortex-M 시리즈는 주변 장치에 대한 인터페 이스를 모두 통일해 놓아 서로 다른 회사들이 라이센스하여 제품을 만들어 내더라도, 개발 환경 및 소프트웨어의 많은 부분을 공유할 수 있게 되어 있다. 따라서 지금까지와는 달리, 여러 회사에서 만들어진 다양한 Cortex-M 시리즈 칩을 사용하더라도, 쉽게 원하는 기능을 개발 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 개발 단계에서부터 저전력 소모, 고성능, 개발 환경통합 및 소프트웨어 호환성, 저가격을 목표로 만들어졌기 때문에 32bit MCU이면서도 1\$ 대의 저가 MCU로부터 많은 기능을 가진 고가 고성능 응용 분야까지 융통성 있는 적용이 가능하다. Table 10은 선정한 모듈인 Core407V 제원이다.

Index	Specification
CPU core	32bit Cortex-M4+FPU
Voltage	1.8~3.6V
Operation frequency	168MHz, 210 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz
Package	LQFP100
Memory	512kB Flash, 192+4kB SRAM
Communication interface	SPI, USART, UART, I2S, I2C FSMC, SDIO, CAN USB, Ethernet MAC, Camera interface
GPIO	110m (Max) 0.3m (Min)
PWM	±20knots
ADC	3 × 12-bit
DAC	2 × 12-bit
DMA	16stream
Debug mode	Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
Dimension	55mm × 65mm × 23mm

Table 10 Specification of Core407V



Fig. 15 Core407V (STM32F407V)

자세제어보드는 선정된 마이크로 컨트롤러를 사용하여 설계되었다.(부록) 자세제어보드는 자세제어기와 부력엔진의 모터드라이버, 자율제어보드와 통신을 하며, 자세제어기 및 부력 엔진의 리미트 센서인 포토센서, 누수 센서는 I/O 및 Interrupt로 제어되며, 추진기인 BLDC 모터와 러더 제어를 위한 서보모터는 PWM으로 제어된다. 이와 같은 기능이 모두 사용될 수 있도록 회로를 설계하였으며, 추가적으로 다른 장치를 부착하여 통신 및 제어를 할 수 있도록 여분의 기능과 채널 등을 더 구성하여 설계하였다. Table 11에 설계된 회로의 제원 을 표기하였다. 또한 설계된 회로를 기반으로 130mm × 70mm 크기의 자세제어보드 PCB를 설계하고 제작하였다.

	-
Index	Specification
Voltage	5V
Voltage	±15V (use Op-amp)
Communication type	UART or RS232 6ea
PWM channel	4ea(3.3V Level)
	2ea(5V Level)
I/O	Input 4ea, Output 4ea(3.3V Level)
	Output 2ea(5V Level)
DAC	2ea(3.3V Level)
	2ea(5V Level)
ADC	2ea(3.3V Level)
I/0 Interrupt channel	6ea

Table 11 Specification of Attitude control board



3.3.1 부력엔진 제어시스템

부력엔진 제어시스템이 제어하는 것은 내부 피스톨의 위치를 이동시켜 부력량을 제어하는 것이다. 피스톨의 위치를 이동시키는 액추에이터로는 200Watt DC 모터가 이용되었으며, 이 를 제어하기 위해 Fig. 16과 같은 Robo cube사의 CUBE-DC3606- DID 200Watt급 모터드라이 브를 사용하였다. RS232 통신 인터페이스를 이용하여 제어 명령을 전달하며 비교적 비용이 저렴하고 신뢰도가 높아 이 제품을 선정하였다. CUBE-DC3606-DID 모터드라이브의 제원은 Table 12와 같다.

Index	Specification
Min / Max supply voltage	12~45V
Nominal supply voltage	36V
Number of motors to drive	2ea
Continuous coil current amplitude at Ta=25℃, 20kHz PWM	6A
Maximum momentary coil current amplitude	12A
PWM Frequency	20 ~ 100kHz
Communication type	RS232, RS485, CAN
Weight 19	45 44g
Dimension	80mm x 50mm x 17mm

Table 12 Specification of CUBE-DC3606-DID



Fig. 16 Motor drive of Buoyancy engine



부력엔진 제어시스템에 사용된 모터에 결합된 엔코더가 절대값 엔코더가 아니므로 초기 동작 시에 중심점을 맞춰주기 위하여 초기 시퀀스를 수행한다. Fig. 17과 같이 초기 시퀀스 는 부력엔진 안에 피스톨을 선수 방향으로 이동시켜 끝단에 설치되어 있는 리미트 센서까지 이동한다. 끝단에 위치하게 되면 이후 미리 설정된 중심점으로 이동하며 초기 시퀀스를 마 친다. 이후 자율제어보드의 명령에 따라 부력엔진의 피스톨을 이동시키는데 제어량 (Controlled variable)은 PID제어(Proportional Integral Derivative control) 기법을 통해 제어해 준다. Table 13과 같이 이동 가능한 거리는 중심점으로부터 ±6.8cm까지 가능하며, 약 1mm 정도의 분해능을 가지며 제어된다. 이때 부력 제어량은 ±432g이다.

Index	Specification
Distance of Buoyancy engine	150mm
Movable distance	±6.8Cm
Resolution	1mm
Volume of buoyancy	±432g
	Isomm

 Table 13 Specification of Buoyancy engine

Fig. 17 Controlled variable of Buoyancy engine



3.3.2 자세제어기 제어시스템

자세제어기 제어시스템이 제어하는 것은 무게 질량의 위치를 이동시켜 선체의 무게 중심 을 제어하는 것이다. 무게 질량의 위치를 이동시키는 액추에이터로는 11Watt DC 모터가 이 용되었으며, 이를 제어하기 위해 Fig. 18과 같은 부력엔진 제어시스템에서도 사용된 Robo cube사의 CUBE-DC3601-DII 50Watt급 모터드라이브를 사용하였다. RS232 통신 인터페이스 를 이용하여 제어 명령을 전달하며 비교적 비용이 저렴하고 신뢰도가 높아 이 제품을 선정 하였다. CUBE-DC3601-DII의 모터드라이브의 제원은 Table 14와 같다.

Index	Specification	
Min / Max supply voltage	12~45V	
Nominal supply voltage	36V	
Number of motors to drive	2ea	
Continuous coil current amplitude at Ta=25℃, 20kHz PWM	1.5A	
Maximum momentary coil current amplitude	3A	
PWM Frequency	20 ~ 100kHz	
Communication type	RS232, RS485, CAN	
Weight	24g	
Dimension Off O	65mm x 39mm x 15mm	

Table 14 Specification of CUBE-DC3601-DII



Fig. 18 Motor drive of Attitude controller



자세제어기 제어시스템에 사용된 모터에 결합된 엔코더는 부력엔진과 같이 절대값 엔코더 가 아니므로 초기 동작 시에 중심점을 맞춰주기 위하여 초기 시퀀스를 수행한다. Fig. 19와 같이 초기 시퀀스는 자세제어기에 장착되어 있는 무게 질량인 배터리팩을 선수 방향으로 이 동시켜 끝단에 설치되어 있는 리미트 센서까지 이동한다. 끝단에 위치하게 되면 이후 미리 설정된 중심점으로 이동하며 초기 시퀀스를 마친다. 이후 자율제어보드의 명령에 따라 자세 제어기의 배터리팩을 이동시키는데 제어량은 PID제어 기법을 통해 제어해 준다. Table 15와 같이 이동 가능한 거리는 중심점으로부터 ±9.5cm까지 가능하며 약 1mm 정도의 분해능을 가지며 제어된다. 이때 질량 제어량은 ±4.7kg이다.



Table 15 Specification of Attitude controller

Fig. 19 Controlled variable of Attitude controller



3.3.3 추진기 및 러더 제어시스템

HUG에 복합 추진 방식을 적용하기 위해 추진기를 사용한다. 사용된 추진기의 제원은 2.2.3에 작성한 것과 같다. 추진기 제어시스템이 제어하는 것은 추진기의 RPM(Revolution Per Minute)을 조절하여 선체의 선수방향으로 생기는 전진 속도를 제어하는 것이다. 추진기 는 주어진 명령에 따라 PWM 신호를 조절하는데 제어량은 PID제어 기법을 통해 제어해 준다.

러더 제어시스템이 제어하는 것은 러더의 각도를 조절하여 선체의 선수동요각을 제어하여 수중 글라이더가 나아가는 방향을 제어는 것이다. Fig. 20의 좌측과 같이 러더는 내부에서 보면 액추에이터인 서보모터와 연결이 되어 있으며, 이것은 PWM 신호에 따라 회전각이 결 정된다. 사용된 서보모터는 Fig. 20의 우측과 같은 Hitec사의 HS-5645MG이며 제원은 Table 16과 같다.



Fig. 20 Rudder of HUG(L) / Servo motor of Rudder(R)



Index	Specification
Product number	HS-5645MG
Voltage	4.8~7.4V
Torque	10.3~12.1kg
Speed	0.23~0.18sec
Weight	55.2g
Dimension	40.6mm × 19.8mm× 37.8mm

Table 16 Specification of Servo motor

Table 17은 설계된 러더의 제원이다. 러더는 HUG의 바닥면에 부착되어 있으며, 러더의 움직임은 기구적으로 선체의 길이 방향을 기준으로 ±30°즉, 총 60°를 움직일 수 있다. 하지만 수중 글라이더는 비교적 선수동요각의 큰 변화가 요구치 않으므로 러더의 각도는 최 대 ±20°로 움직임을 고정하고 있다. 러더는 약 2°정도의 분해능을 가지고 제어된다.

Table 17 Specification of Rudder

Index	Specification
Angle of Rudder	1945 60°
Movable Angle	$\pm 20^{\circ}$
Resolution	2°



3.4 센서 시스템

HUG의 전원 및 센서 구성은 Fig. 21에 나타내었다. 전원은 24V와 36V 배터리팩 2개에서 공급을 받는다. 24V 배터리팩은 앞단 하우징에 내장되어 있으며, 36V 배터리팩은 뒷단 하우 징에 내장되어 있다. 사용된 센서는 카울링에 측심기를 장착하여 선체가 하강 주행 시에 해 저 바닥면에 충돌하는 것을 방지한다. 앞단 하우징에는 누수를 감지하기 위한 누수 센서가 하우징과 노즈콘이 결합되는 부위에 장착되어 있다. 추가 탑재 공간에는 항법 알고리즘에 사용될 선체의 속도를 측정하기 위한 DVL를 Transducer의 방향이 바닥면을 향하게 장착하 였다. 뒷단 하우징에는 장비를 탑재할 수 있는 공간이 넓어 많은 센서와 장비를 탑재하고 있다. 순서대로 수중에서 선체의 깊이를 측정하기 위한 수심 측정기, 선체의 자세 및 방향 을 계측하기 위한 AHRS, 하우징과 카울링이 결합되는 부위에 누수 센서, 각 센서 및 장비에 전원을 공급하고 배터리를 관리하는 전원보드가 장착되어 있다. 카울링의 상단 날개에는 HUG의 위치 정보 계측을 위한 GPS Antenna와 명령 전달 및 정보 수집을 위한 RF Antenna 가 장착되어 있으며, 카울링의 후면에는 자체 추진을 위한 추진기가 장착되어 있다.



Fig. 21 Sensor arrangement of HUG





3.4.1 DVL

DVL(Doppler Velocity Log)은 수중에서 잠수정의 속도를 계측하는 대표적인 센서 중 하나 이다. 3축의 속도 값을 도플러 효과에 의해서 최대 20Hz의 속도로 계측하며, 계측된 값을 프로그램을 이용하여 적분하고 x, y 변위를 구하게 된다. DVL은 바닥면의 반사파를 이용하 여 계측하므로 Transducer는 아래를 향하고 있어야 하며 수중 로봇이 바닥면에 앉아 있는 경우에도 계측이 가능하도록 최소 측정 거리인 50cm이상의 높이에 설치되어야 한다. Transducer의 방향은 Beam1과 Beam3 사이의 위치가 전방을 향해야 한다. Fig. 22는 HUG에 탑재된 DVL이며 Table 18은 주요 사양이다.

Index	Specification
Power	80watts (Maximum transmit) 2~5watts (Average power)
Voltage	$24 \pm 2V$
Protocol type	RS232 or RS485 (8bit, 1stop, No parity)
Weight	2.9kg (In air) 1.2kg (In water)
Dimension	126(Ø)mm × 170mm
Maximum velocity	±20knots
Maximum sampling rate	20Hz
Transducer	4 Beam convex
Transducer beam angle	22°

Table 18 Specification of DVL



Fig. 22 NavQuest600 Micro DVL



3.4.2 AHRS

AHRS(Attitude Heading Reference System)는 자세 방위 장치이다. Roll과 Pitch정보를 자세 (Attitude)라고 하고, Yaw정보는 방향(Heading)으로 분류한다. MEMS기반인 자이로스코프 및 참조 센서(지자기 센서 및 가속도계)와 함께 3D Orientation을 계산한다. AHRS는 간혹 관성 자이로스코프를 적분하여 3D Orientation을 제공하는 IMU(Inertia Measurement System)라고 불리기도 한다. 자이로(Gyro), 가속도계(Accelerometer), 그리고 지자기 센서(Magnetometer) 등을 복합, 적분 연산하여 자세 정보를 출력한다. 이때 적분오차는 참조 벡터, 즉, 중력과 지자계로 보상할 수 있다. 이 결과, 오차가 없는 Orientation, 오직 자이로스코프만 적분하고 자이로스코프의 아주 높은 오차 안정성에 의존하는 전통적인 고급의 IMU와 비교하여 비용 대비 성능이 효율적인 센서이다.

고가의 IMU는 일반적으로 선박(특히 잠수함), 항공기 및 지상 방위 응용분야에 적용하며 장기적으로 자세 측정 영역에 사용되고 있었다. 이러한 고가의 IMU는 높은 가격 때문에 소 형 무인 운전 차량 및 원격조정 잠수함(ROV)과 같은 소규모 응용분야에 적용하기 힘들었다. 그러나 MEMS AHRS의 현 기술 상황은 이러한 지능형 MEMS AHRS가 선정된 응용분야에서 가격이 높은 IMU를 대체할 수 있게 하였다.

AHRS에 포함된 자이로 센서의 적분 값과 가속도계의 각도를 이용하여 선체의 자세(Roll, Pitch)를 추정하며, 여기에 지자기 센서를 이용한 자북 방향 값을 이용한 방향(Heading)을 추 정한다. 출력된 추정 자세 및 방향을 이용하여 선체의 Heading 제어와 선체 고정 좌표계의 궤적을 지구 고정 좌표계로 변환하는데 이용하게 된다. HUG에 사용된 AHRS는 Xsens사의 MTi-28A 시리즈 제품이며, Fig. 23과 같으며 Table 19는 제원을 나타낸다.



Fig. 23 AHRS



Index	Specification
Voltage	4.5~30V
Protocol Type	RS232, RS485
Update Rate	user settable, max 256Hz
Dynamic Range	all angles in 3D
Angular Resolution	0.05°
Repeatability	0.2°
Static Accuracy (roll/pitch)	0.5 °
Static Accuracy (heading)	1.0°
Weight	50g
Dimension	58mm x 58mm x 22mm

Table 19 Specification of AHRS

TIME AND OCEAN

3.4.3 수심측정기

수중에서 깊이를 가장 쉽게 계측할 수 있는 방법은 수심 측정기(Depth sensor)를 이용하 는 것이다. 수중 로봇에서는 수심 측정기를 통해 압력 값을 계측하고 계측된 값을 이용하여 수심 방향의 제어를 하게 된다. Fig. 24는 HUG에 장착된 수심 측정기이다. Table 20에서 보 이듯이 Keller 사의 절대 타입을 사용하였으며, 기존의 아날로그 출력 방식을 대신하여 RS485 통신 인터페이스를 지원하는 제품을 사용하므로 시스템을 단순화하고 하드웨어적으 로 데이터의 손상 및 변질이 생기는 것을 방지하여 출력 값의 신뢰도를 높였다. 수심 측정 기의 계측 성능이 최대 100bar의 값을 계측할 수 있으며, 이는 설계 시 작업 수심으로 설정 한 200m를 초과하여 계측이 가능한 수치이다.



Fig. 24 Depth sensor



Index	Specification	
Voltage	8~28V	
Protocol Type	RS485	
True Output Rate	400Hz	
Accuracy	0.1%FS (10…40℃)	
Range	100bar	
Туре	Absolute (Zero at vacuum)	
Weight	160g	
Dimension	27(Ø)mm × 106mm	

Table 20 Specification of Depth sensor

3.4.4 측심기

수중에서 선체와 해저 사이의 거리를 측정하기 위한 방법은 측심기(Altimeter)를 이용하는 것이다. 앞서 소개한 수심 측정기는 해수면에서 선체까지의 거리를 측정하기 때문에 해저면 과 선체 간의 거리를 계측할 수 있는 방법이 없어 글라이딩 주행 중에 해저면과 충돌을 할 수 있다. 때문에 측심기로부터 해저면까지의 거리 값을 계측하여 수중 글라이더의 해저면 충돌 회피 알고리즘에 사용된다. Fig. 25는 HUG에 장착한 측심기이다. Table 21에서 보이듯 이 Tritech사의 측심기를 사용하였으며, 수심 측정기와 동일하게 기존의 아날로그 출력 방식 을 대신하여 RS232 통신 인터페이스를 지원하는 제품을 사용하므로 하드웨어적으로 데이터 의 손상 및 변질이 생기는 것을 방지하여 출력 값의 신뢰도를 높였다. 측심기의 계측 성능 은 최대 감지거리 100m이며, 빔폭은 20°이다.



Fig. 25 Altimeter



Index	Specification
Voltage	24V
Protocol Type	RS232
Operating frequency	200kHz
Beamwidth	20° conical
Range	0.7 to 100m
Digital resolution	lmm
Weight	1.3kg (In air)
	0.95kg (In water)
Dimension	$47(\varnothing)$ mm \times 213mm

Table 21 Specification of Altimeter

3.4.5 GPS

d Collection

GPS(Global Positioning System)는 범지구 위성항법시스템이다. GPS에서 일반적으로 위치 정보를 계측하는 방법은 GPS 수신기로 3개 이상의 위성으로부터 정확한 시간과 거리를 측 정하여 3개의 각각 다른 거리를 삼각 방법에 따라서 현 위치를 정확히 계산한다. 다음으로 현재 3개의 위성으로부터 거리와 시간 정보를 얻고 1개 위성으로 오차를 수정하는 방법을 일반적으로 널리 쓰고 있다.

나침반과 달리 위성항법시스템은 위도·경도·고도의 위치뿐만 아니라 3차원의 속도 정보 와 함께 정확한 시간까지 얻을 수 있다. 위치 정확도는 군사용과 민간용에 따라 차이가 있 으며, 민간용은 수평·수직 오차가 10~15m 정도이며 속도측정 정확도는 초당 3cm이다. 또 한, 인공위성에는 3개의 원자시계가 탑재되어 있어 3만 6000년에 1초만의 오차를 갖는 시간 정보를 제공하고 있다.

GPS는 현재 단순한 위치정보 제공에서부터 항공기·선박·자동차의 자동항법 및 교통관 제, 유조선의 충돌방지, 대형 토목공사의 정밀 측량, 지도제작 등 광범위한 분야에 응용되고 있으며, GPS 수신기는 개인 휴대용에서부터 위성 탑재용까지 다양하게 개발되어 있다. 이렇 게 GPS는 적은 비용으로 수상, 육상 및 항고에서의 위치를 계측할 수 있는 센서이다.

수중 로봇에 GPS를 적용했을 때 장점은 더욱 부각된다. GPS의 장점은 흔히 수중 로봇에 서 자세 및 위치 정보를 계측하기 위한 센서인 DVL과 AHRS, IMU에서 발생하는 적분 오차 가 없다는 것이다. 그로인해 본래 센서의 오차 범위 값으로 오차가 고정되어 먼 거리를 주 행하는 수중 로봇에서 잠수 후 센서 값의 초기화 및 오차 값을 확인하는데 필수 센서이다.





HUG에서는 Fig. 26과 Table 22와 같이 비교적 저렴한 U-BLOX NEO-6M GPS Module를 사용하였으며 센서에서 위치 정보는 5Hz의 Sampling rate로 계측하였다.

Tabl	e 22	Specification	of	GPS
------	------	---------------	----	-----

Index	Specification
Voltage	3.3V / 5V
Protocol type	TTL Level
Chip set	U-BLOX Neo-6M Series
Baud rate	FCN 9600kbps
Horizontal position accuracy	2.5mCEP (SBAS:2.0mCEP)
Navigation update rate	5Hz maximum (1HZ default)
Weight	0.01kg (In air)
Dimension	25mm $ imes$ 30 mm $ imes$ 4 mm

3.4.6 누수 센서

수중 로봇과 같은 플랫폼은 방수가 중요한 설계 요인 중 하나이다. 하지만 플랫폼이 수중 에 들어가게 되면 운용자는 플랫폼 내부로 누수가 발생했는지를 쉽게 알 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 HUG의 내부에는 누수 가능성이 큰 위치에 누수 센서(Water leak sensor)를 장착하였다. 센서는 총 2개 설치하였으며, 위치는 앞/뒷단 각각의 하우징의 결합되 는 부위에 장착되어 있다.







Fig. 27 Water leak sensor

HUG에 사용된 누수 센서는 일반적으로 강우, 수위(Water level detection), 누설 등을 감 지하데 사용하는 수분 측정 센서(Water sensor)를 사용하였다. 본 세서는 1Ω의 저항 라인을 토대로 액체를 감지하며, 감지 신호는 I/O로 출력되며 물이 감지되면 On(3.3V), 감지되지 않 았다면 Off(0V)로 출력된다. 사용된 누수 센서는 Fig. 27이며, 제원은 Table 23과 같다.

Table 23 Specification of water leak sensor		
Index	Specification	
Voltage	3~5V	
Output type	4.5 I/O	
Operation current	< 20mA	
Measurement range	40mm × 16mm	
Impedance	lOhms	
Weight	0.003kg (In air)	
Dimension	65mm $ imes$ 20mm $ imes$ 8mm	

3.5 배터리 및 전원 회로

HUG에 사용된 2개의 배터리 팩은 리튬인산철(LiFePO4) 배터리 셀의 조합으로 만들어졌 다. 사용된 배터리 셀의 제원은 Table 24와 같다. 배터리 셀은 완충 시에 3.9V, 방전 시에 2V의 전압을 가지며, 기준 전압은 3.2V이다. 용량은 15Ah이고 내부 저항은 8mΩ 이다. 이와 같은 배터리 셀을 24V 배터리 팩은 1P 8S, 36V 배터리 팩은 1P 12S 직렬로 연결하여 구성 하였다. 제작된 배터리팩은 Fig. 28과 같은 24V 360W, Fig. 29와 같은 36V 540W이다.





Index	Specification
Nominal voltage	3.2V
Capacity	15Ah
Charging current	3A 0.2C rate (Standard charging) 7.5A 0.5C rate (Max. charging)
Max. Discharging Rate	75A 5C (Max. continuous discharging) 150A 10C (Max. Peak discharging)
Cut-off voltage	Charging : 3.9V Discharging : 2V
Internal resistance	8m Ω
Weight	480g
Dimension	40(∅)mm × 165mm

Table 24 Specification of Battery cell



Fig. 28 24V 360W Battery pack (1P 8S)



Fig. 29 36V 540W Battery pack (1P 12S)



전원보드는 Fig. 30과 같이 각 센서 및 장비에 필요한 전원을 DC-DC 변환기를 이용하여 변환하여 공급한다. 전자로부터 공급되는 전원이 모터 요구사양에 따라 36V로 설계되어 있 어 DC-DC 변환기의 입력 범위가 넓어야 하며 일반적인 산업표준인 48V 입력 표준을 따르 게 된다. Table 25는 선정된 각각의 DC-DC 변환기 형상 및 제원이다.

앞서 선정한 DC-DC 변환기를 이용한 전원보드 회로도를 설계하였다.(부록) 각각의 DC-DC 변환기 입력과 출력에 Ripple 및 Noise를 감쇠시킬 수 있는 필터를 설계하였다. 또 한 선정한 DC-DC 변환기는 출력을 제어할 수 있는데, 이는 On/Off control pin인 CNT를 제 어함으로써 이루어진다. 이때 주의해야 할 점은 전원 분리형인지 비 분리형인지 구분하여 제어해야 한다. 또한 CNT 제어를 할 경우 Open Collector형 IC를 이용하여 인터페이스하는 것이 일반적이다. 출력된 각각의 전압을 눈으로 쉽게 확인하기 위해 전원 동작 확인회로를 추가하였다. 이는 전원보드의 동작을 육안으로 확인하기 위해 LED를 이용한 회로를 이용하여 설계하였다. LED를 이용할 경우 전류제한을 위한 저항을 사용하였다. 이와 같은 주의 사 항을 인지하여 전원 회로를 설계하였으며, 설계된 회로를 기반으로 전원보드 PCB를 설계 및 제작하였다. 보드의 크기는 대략 175mm × 70mm이며 배치를 고려하여 고정 홀 및 커넥 터를 배치하고 DC-DC 변환기 등 주요 부품을 장착하였다.



Fig. 30 Block diagram of Power board



Index	Specification
****** SPS20-48-5 ******	Model number : SPS20-48-5 Input range : 48V (36~75V) Efficiency : 87% Output voltage : 5V Maximum power : 20W Output Voltage Tolerance : ±2.0% Ripple and Noise : 2% of Vout (Bandwidth : 20MHz) Ripple&Noise Max. : 70mVp-p
· cur PBR50-48-5 2008101 TRU · · une POWERCINES · · · · · une POWERCINES · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Model number : PBR50-48-12 Input range : 48V (36~75V) Efficiency : 92% Output voltage : 12V Maximum power : 49.2W Output Voltage Tolerance : ±2.0% Ripple and Noise : 1% of Vout (Bandwidth : 20MHz) Ripple&Noise Max. : 120mVp-p
PD25-48-1515 PD25-48-1515 POWERCUAIA MAGE IN KORES	Model number : PD25-48-1515 Input range : 48V (36~75V) Efficiency : 86% Output voltage : \pm 15V Maximum power : 25.2W Output Voltage Tolerance : \pm 2.0% Ripple and Noise : 1% of Vout (Bandwidth : 20MHz) Ripple&Noise Max. : 150/150mVp-p

Table 25 Specification of DC-DC Converter

또한 전원 스위칭을 위한 회로를 P-타입 FET(Field Effective Transistor) 소자를 이용하여 설계하였다.(부록) 전원 스위칭 회로에서 일반적으로 사용되는 N-타입 FET가 아닌 P-타입 FET를 사용한 이유는 24V와 36V 배터리팩의 접지가 공통되어야하며 전장과 결합한 뒤에도 접지가 문제 없어야하기 때문에 P-타입 FET를 선정하여 설계하였다.

Collection

제 4 장 제어 알고리즘 연구

4.1 동역학 모델링

수중 로봇의 수학모델을 정의하기 위해 선체를 강체라 가정하고, Fig. 31과 같이 선체 고 정 좌표계(Body fixed coordinates)와 지구 고정 좌표계(Earth fixed coordinates)를 사용하였 으며 선체 고정좌표계의 원점을 상하좌우의 중심부로 정하여 선수방향을 *x*, 우현방향을 *y*, 수직 아래 방향을 *z*으로 하는 오른손 좌표계를 사용하였다. 선체 고정 좌표계에서의 운동은 지구 고정 좌표계에 관하여 표현한다.

지구 자체의 공전과 자전에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고 수중 로봇의 속도에 영향 을 미치지 않는다고 가정한다. 지구 고정 좌표계는 관성 고정 좌표계(Inertial fixed coordinates)이라고도 한다. 따라서 수중 로봇의 위치와 자세는 관성 고정 좌표계를 통해 표 현하며, 수중 로봇의 선형 속도와 각 속도는 선체 고정좌표계에 의해 표현된다.

HUG의 x, y, z축에 대한 병진 운동과 회전 운동을 6자유도 운동으로 표현하였으며, 사용 된 좌표축과 명칭은 Table 26과 같다.



Fig. 31 Earth fixed and body fixed coordinate system



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

Table 26 6 D.O.F motion of the underwater vehicle

지구 고정 좌표계에 대한 선체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한 다. 오일러 각은 지구 고정 좌표계를 각 축에 대하여 선체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어 지는 각으로 회전은 롤(Φ), 피치(θ), 요(ψ)의 순으로 정한다. 오일러 각의 경우 동체의 자세 가 수직에 가까워지면 자세를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있으나 수중 로봇의 경우 자세 가 수직에 가까운 운동이 거의 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다고 판단되어진다.(김 기훈, 2005)

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

$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1^T & \boldsymbol{\eta}_2^T \end{bmatrix}^T$	$\eta_1 = [x \ y \ z]^T$	$\eta_2 = \begin{bmatrix} \varPhi & \theta & \psi \end{bmatrix}^T$	(1)
$\boldsymbol{\upsilon} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\upsilon}_1^T & \boldsymbol{\upsilon}_2^T \end{bmatrix}^T$	$v_1 = [u \ v \ w]^T$	$\mathbf{O} \models \mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} p & q & r \end{bmatrix}^T$	
$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1^T & \tau_2^T \end{bmatrix}^T$	$\tau_1 = \begin{bmatrix} X & YZ \end{bmatrix}^T$	$\tau_2 = \left[K M N \right]^{T^T}$	

η 는 지구 고정 좌표계로 표현하는 선체의 위치와 자세, ν 는 선체 고정 좌표계로 표현 하는 병진과 회전속도, τ 는 선체 고정 좌표계로 표현하는 수중 로봇의 전체 힘과 모멘트 이다. 선체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계 사이의 병진 속도의 좌표 변환은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1$$
 (2)

식 (2)를 행렬로 표현하면 식 (3)과 같다.

Collection

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

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

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

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

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

 $J_{1}(\eta_{2}) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta \\ \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$ (5) $d\mathbb{A} \quad \mathbb{Z} \ \mathbb{Z}$

식 (6)을 행렬로 표현하면 식 (7)과 같다.

Collection

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

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

$$J_{2}(\eta_{2}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi\tan\theta & \cos\Phi\tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \frac{\sin\Phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\Phi}{\cos\theta} \end{bmatrix}$$
(8)

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

$$r_{G} = \begin{bmatrix} x_{G} \ y_{G} \ z_{G} \end{bmatrix}^{T}$$

$$r_{B} = \begin{bmatrix} x_{B} \ y_{B} \ z_{B} \end{bmatrix}^{T}$$
(9)

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

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

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

Collection

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

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

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

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

$$\sum F_0 = F_{hydrostatic} + F_{lift} + F_{drag} + F_{control}$$

$$\sum M_0 = M_{hydrostatic} + M_{lift} + M_{drag} + M_{control}$$
(13)



4.2 제어 알고리즘



Fig. 32 Control algorithm diagram of HUG

Table 27 Parameters of control algorithm for HUG

Parameters	Description	
$W_d(x,y)[]$	Vertex array	
$W_d(x,y)[n]$	Current vertex	
θ_d	Target pitch	
Z_C, Z_B	Depth upper/lower	
Z	Current Depth	
Р	Buoyancy control value	
θ	Current pitch	
ψ	Current yaw	
$P_{e}(x,y)$	Estimated position	
P(x,y)	Revise GPS value	



Fig. 32는 HUG의 제어 알고리즘을 표현한 것이며, Table 27은 알고리즘에 표현한 파라미 터를 표로 정리한 것이다. 수중 글라이더의 초기 입력 데이터는 선체의 목표 Pitch 및 운용 수심의 상/하한, 부력 제어량을 입력하며, 해양의 원하는 경유 위치를 입력해 준다. 수중 글 라이더는 운용 환경이 각각 다르기 때문에 최소한의 운용환경에 대한 데이터를 입력하는 것 이다. 운항 방식은 출발점의 GPS 데이터와 첫 경유지의 위치를 확인 하여 Heading 각을 계 산 후 지정된 부상 시간동안 Heading 각을 따라 주행 후 다시 GPS를 보정하여 경유점의 반 경까지 찾아 가는 방식이다. 경유점의 반경에 들어오면 다음 경유점을 향해 다시 앞에서와 같은 방법으로 주행을 한다.

4.3 항법 알고리즘

본 HUG의 항법 알고리즘은 다중 센서 시스템을 기반으로 이는 각각의 센서를 융합하는 방법이 대단히 중요하다. 칼만 필터(Kalman filter)는 센서의 항법 신호를 필터링하는 일반적 인 방법으로서, 하나의 항법 센서를 주 센서로 정하고 나머지를 Redundant 시스템으로 정하 거나 보조센서로 처리하여 주 센서의 오차를 보상하는 형식을 취한다.(Maybeck, P.S, 1996) 칼만 필터는 선형 시스템에 대해 시간 지연 없이 뛰어난 노이즈 제거 성능을 보인다. 특히, 시스템을 알고 있기 때문에 측정값의 미분 또는 적분 값을 구하는 경우에도, 시스템 모델에 파라미터를 포함시키게 될 경우에 거의 정확하게 구할 수 있다. 그러나 시스템이 선형일 경 우에만 사용할 수 있기 때문에 한계를 가진다. 이를 위해 비선형 시스템을 특정 구간에서 선형화 하여 선형화 칼만 필터를 사용하기도 하지만 모델링 시에 지정한 구간 내에서만 의 미 있는 결과를 도출할 수 있다.

이를 해결하고자 비선형 시스템에서 칼만 필터를 사용할 수 있도록 만든 것이 확장 칼만 필터이다. 수중 운동체인 수중 글라이더는 비선형 시스템이기 때문에 이에 적합한 확장 칼 만 필터(Essential Kalman Filter, EKF)를 사용하였다.

필터 알고리즘은 Fig. 33을 따른다. 아래 첨자(0, k 등)는 데이터의 순서를 의미한다. 윗첨 자 '-'는 예측 값을 의미하며, '^'는 추정 값을 의미한다. z는 측정값, x는 출력 값, P는 오차 공분산, K는 칼만 이득, A, H, Q, R은 시스템 모델에서 얻는 행렬이다. f(), h()는 비선 형 시스템의 함수이다. 초기 값을 선정한 후(k > 0일 때)에는 예측 단계와 추정 단계를 계속 반복(recursive data processing)하며, 추정 단계 중 3단계에서 측정값을 사용하고 출력 값을 내어준다.

확장 칼만 필터는 칼만 필터와 동일한 과정을 따른다. 더욱이 예측 단계에서 예측 값을 계산할 때, 그리고 추정 단계인 3단계에서 추정 값을 계산할 때, A와 H 행렬이 비선형 시스 템의 함수 f()와 h()로 바뀐 것을 제외하면 완벽하게 선형 칼만 필터와 동일하다. 심지어 Q 와 R은 칼만 필터에서와 완벽하게 동일하게 취급된다.

그러나 A, H 행렬이 시스템 함수 f0, h0로 바뀌었기 때문에 이 비선형 함수에서 A, H 행 렬을 뽑아내어야 한다. 뽑아내는 방법은 역시 선형화를 하는 것인데, 직전 추정 값을 중심 으로 선형화를 매번 수행하게 된다. 선형화 방법은 고전적인 구간 선형화 방법과 동일하며 식 (14)와 같다.

$$A = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{\hat{x}_k}, \quad H = \frac{\partial h}{\partial x}\Big|_{\hat{x}_k^-}$$
(14)

여기서 $\frac{\partial}{\partial x}$ 는 해당 함수를 변수 x에 대해 편미분한다는 뜻이다. 예를 들어 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 는 함수 f = x에 대해 편미분한다는 의미이다. 만약 f와 x가 벡터이면 이 값은 행렬이 된다. 이렇

Collection

게 계산하는 행렬을 자코비안(Jacobian)이라고 한다. 그리고 $\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{\hat{x}_k}$ 는 행렬 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 에 \hat{x}_k 를 대입 하여 계산한 값을 의미한다. 확장 칼만 필터에서는 자코비안으로 구한 행렬의 초기 값을 얻 을 수 없기 때문에 초기 값을 임의의 추정 값으로 최초에 한번 주어야 한다. 이때, 초기 값 에 따라 결과가 발산할 수도 있기 때문에 초기 값을 잘 설정해주어야 한다.

본 연구에서 구성한 항법 시스템은 Fig. 34와 같다. 본 시스템은 입력 데이터는 AHRS에서 자세 값(Φ,θ,ψ), DVL에서 LPF(Low Pass Filter)를 통한 속도 값(V_x, V_y, V_z), GPS에서 위치 값(P_x, P_y), 수심 측정기에서 LPF를 통한 수심 값(Z)의 데이터를 받아 앞서 설명한 확장 칼 만 필터를 이용하여 자세, 속도, 위치를 추정한다. 연산에 쓰이는 센서 데이터의 조합은 선 체가 수중과 수상에 있을 때 다르다. 수중 시에는 GPS를 제외한 나머지 센서들로 위치 값 을 추정하며, 수상으로 선체가 올라왔을 시 GPS의 값을 받아 위치 값을 보정하게 된다. 이 러한 이유는 원천적으로 수중에서는 GPS의 값을 받지 못하며, DVL 센서의 노이즈로 인하여 적분 과정을 통하여 위치를 구하는 과정에서 위치 오차가 증가하며, AHRS는 짧은 시간에서 의 위치는 정확하지만 시간에 따른 에러가 증가하기 때문에 GPS로 위치 정보로 보정해준 다.

Fig. 34 Navigation system

제 5 장 성능 시험

5.1 DVL 성능 시험

Collection

Fig. 35 Test-bed of DVL

DVL 센서는 항법 알고리즘에 사용되는 Reference 센서 중에 하나이다. 그렇기 때문에 실 제 장비 사용 전에 센서의 정확도 및 성능을 측정해볼 필요성이 있다. Fig. 35는 성능 시험 에 앞서 제작한 시험 장치이다. 장치는 5m × 7m의 크기로 재질은 알루미늄 프로파일을 사 용하여 실내 수조에 설치되었으며, 고정된 상태로 3축으로 DVL을 움직일 수 있도록 설계되 었다. 기구는 120W급 DC모터로 구동되며, 조이스틱을 통하여 각각의 축을 속도제어를 할 수 있다.

시험은 HUG 제작에 사용된 DVL을 선체에서 분리하여 개별로 부착하여 실시하였다. 수조 의 가로 길이가 5m이므로 센서가 벽에 가까이 붙어 생기는 노이즈를 방지하며 안정성을 위 해 약 4m를 가로, 세로 방향으로 두 가지 경우의 시험을 진행하였다.

Fig. 36은 DVL의 x축 방향으로 전/후진을 2회 반복 수행한 측정 결과이다. 이때의 입력 속도는 0.3m/s로 설정하였다. 상단 그래프는 Euler 각도를 나타내며 하단 그래프는 각 축의 속도를 나타낸다. 상단 그래프의 Yaw가 상승-하강 부분은 후진, 하강-상승되는 부분은 전진 을 한다는 것을 두 그래프를 보고 알 수 있다. 측정된 속도 값에 노이즈가 포함된 이유는 실험 수조의 수심이 얕고 또한 기구를 구동 시에 DVL이 고정된 부분이 떨리는 이유들로 인 해 측정된 속도 값이 일정하지 않고 떨리는 것으로 본다. 속도 그래프를 보면 x축의 측정된 실제 속도는 평균 0.27m/s로 입력 속도인 0.3m/s와 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 37은 DVL의 y축 방향으로 전/후진을 2회 반복 수행한 측정 결과이다. 이때의 입력 속도는 0.3m/s로 설정하였다. 속도 그래프를 보면 y축의 측정된 실제 속도는 평균 0.3m/s로 입력 속도인 0.3m/s와 같은 것을 알 수 있다. 본 DVL 성능 시험을 결과를 바탕으로 DVL에 서 출력되는 속도 값이 신뢰할만한 결과라는 것을 알 수 있다.

Fig. 37 Y-axis velocity test of DVL

5.2 GPS 성능 시험

GPS 센서는 DVL과 같이 항법 알고리즘에 사용되는 Reference 센서 중에 하나이다. 그렇 기 때문에 실제 장비 사용 전에 센서의 정확도 및 성능을 측정해볼 필요성이 있다. 먼저 GPS의 성능을 측정하기 위해서는 고시좌표(기준좌표)가 되는 장소를 찾아야 한다. 국토지리 정보원 상시관측소에서 게시된 고시좌표 중 하나인 부산대학교의 고시좌표를 이용하였으며, 정지 상태에서 GPS의 성능 시험을 실시하였다.

또한 GPS는 초기 동작 시에는 위성과의 연결이 온전하지 않아 데이터의 신뢰성이 낮기 때문에 본 시험에서는 위성과의 정상적인 연결을 위해 전원을 켜고 20분 후부터 데이터를 수집하였다. 그리고 GPS수신기는 NMEA 규격에 의해 GPS신호와 DGPS신호의 좌표를 구분 할 수 있으므로 GPS신호, DGPS신호 2가지로 나누어 비교 시험을 실시하였다.

Fig. 38은 GPS신호(좌), DGPS신호(우)의 오차를 표기한 것이다. 오차는 받은 신호에 고시 좌표계를 빼준 데이터이며, x축은 경도를 거리로 변환한 축이고 y축은 위도를 거리로 변환 한 축이다. 그래프를 보면 GPS신호는 오차가 약 4~5m정도이고 DGPS신호는 오차가 약 1.6m 정도 발생하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 DGPS신호가 GPS신호보다 정확도가 높다는 것을 알 수 있었고, 시스템에 적용 시에 일반적으로 DGPS신호를 잡는데 시간이 걸리므로 GPS신 호로 연산을 진행하다가 DGPS신호를 받을 시에 DGPS신호를 우선적으로 항법 연산에 적용 해야 된다는 결론을 얻을 수 있었다.

Fig. 38 Error of GPS

5.3 항법 알고리즘 성능 시험

외란이 없는 실내수조에서 수중 글라이더의 항법 알고리즘 성능 시험을 실시하였다. 수조 의 크기는 3m × 4m이며, 장소가 협소하여 사람이 선체를 끌어서 시험을 진행하였다. 본 시험을 위해 4.3에서 설명한 것과 같이 AHRS와 DVL 센서를 이용한 항법장치 및 항법 알고 리즘을 구성하여 출력되는 위치 정보의 신뢰성을 판단하는 시험을 진행하였고 결과는 Fig. 39와 같다.

모든 그래프의 시작점은 □, 끝점은 ○이며 모든 결과는 구성한 항법 알고리즘을 통해 출 력된 위치 정보이다. A는 선체를 x축으로 약 2m를 이동한 결과이며, B는 선체를 y축으로 약 2m를 이동한 결과이다. 또한 C는 선체를 가로 1.5m × 세로 2.5m의 크기를 반시계 방향 인 □모양으로 1회 회전한 결과이며, D는 선체를 가로 2.5m × 세로 1.5m의 크기를 시계 방향인 □모양으로 1회 회전한 결과이다.

4가지의 시험 결과 모두 시작점과 끝점의 위치가 유사하였으며, 실제로 선체가 이동한 거 리와 항법 알고리즘을 통해 출력된 위치 정보의 크기가 유사함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 구성한 항법장치 및 항법 알고리즘의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Fig. 39 Result of Navigation algorithm

5.4 자세 및 부력 제어기 성능 시험

일반적인 수중 글라이더의 추진력은 유체의 유입과 배출에 의한 부력 조절과 내부의 질량 이동과 날개의 움직임을 이용한 모멘트 변화에 의해 발생된다. 그렇기 때문에 선체의 자세 제어 시험에 앞서 자세제어기 및 부력엔진의 성능을 확인하기 위하여 시험을 실시하였다.

시험 결과는 Fig. 40과 같으며 자세제어기는 -7 ~ +7cm를 약 0.1m/s의 속도로 반복 이동 하였으며, 부력엔진은 -6.8 ~ +6.8cm를 약 0.04m/s의 속도로 반복 이동하였다. 본 성능 시험 을 통해서 HUG에 장착된 자세제어기 및 부력엔진이 액추에이터 제어시스템의 명령에 따라 정상적으로 구동하는 것을 확인하였으며, 약 0.1mm 단위로 동작이 가능함을 확인하였다.

Fig. 40 Result of Controller test

5.5 자세 제어 시험

자세 제어 시험에 앞서 선행된 시험이 두 가지가 있다. 첫 번째는 부력엔진의 성능을 확 인하는 것이며, 두 번째는 선체를 음성 부력으로 맞춘 뒤 활강 Pitch를 측정하는 것이다. 이 와 같이 두 가지의 시험을 실시한 뒤 자세 제어 시험을 진행하였으며, 모든 시험은 3m × 4m 크기의 외란이 없는 실내수조에 담수를 받아 진행하였다.

첫 번째 시험은 부력엔진의 성능을 확인하기 위한 시험이며, 부력엔진의 기동에 따른 선 체의 Pitch 변화를 확인하였다. 시험 시에 자세제어기는 중립에 고정 후 부력엔진만 음성 부 력을 가지도록 기동하였다. 부력엔진 성능 시험의 결과는 Fig. 41, 42와 같다.

Fig. 41 Performance test of Buoyancy engine #1

Fig. 42 Performance test of Buoyancy engine #2

그래프를 보면 부력엔진 하강 구동 명령에 따라 피스톤이 중립으로부터 약 65mm를 이동 하였으며, 그로인해 선체의 부력이 낮아져 선수가 앞으로 기울어지며 수중으로 하향 활강하 는 모습을 보인 뒤 부력엔진 상승 구동 명령에 따라 다시 선체가 수면에 뜨는 모습을 볼 수 있었다. 이 시험을 통하여 HUG에 장착된 부력엔진이 선체의 부력을 조정할 수 있음을 확인 하였다.

두 번째 시험은 HUG에 장착된 자세제어기 구동으로 인한 무게 질량의 변화에 따른 선체 가 활강하는 Pitch의 변화를 측정하는 시험을 실시하였다. 시험 시에 부력엔진은 선체가 음 성 부력을 갖도록 하한 고정 후 자세제어기만 정밀하게 일정 구간을 기동하게 하였다. 하지 만 선체의 부력이 음성이면 선체가 물 밑으로 가라앉기 때문에 원활한 시험을 위해 선체 중 앙에 줄을 달아 선체가 가라앉지 않도록 고정한 뒤 시험을 진행하였다.

Fig. 43 Pitch test of glider #1

Fig. 44 Pitch test of glider #2

Pitch의 변화를 측정한 결과는 Fig. 43, 44와 같다. 그래프를 보면 자세제어기의 위치가 약 10mm ~ 450mm로 이동함에 따라 선체의 Pitch가 약 40°~ 20°로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이 시험을 통해 자세제어기의 위치에 따라 대략적인 선체의 Pitch를 추정하는 것이 가능해졌다.

마지막 시험은 HUG의 자세 제어 시험을 실시하였다. 본 시험은 선행된 시험의 데이터를 바탕으로 선체의 Pitch를 일정 수치로 유지할 수 있도록 PD제어기를 이용하여 자세제어기를 정밀하게 제어하는 시험이다. 초기 동작 시에 선체의 부력을 음성으로 만들기 위해 부력엔 진을 하한으로 기동한 뒤 고정 시킨다. 그 뒤에 자세제어기를 기동하여 선체의 Pitch를 약 25°로 제어하도록 설정하였다. 시험 결과는 Fig. 45, 46과 같으며, 결과 그래프에서 보이듯 이 선체의 Pitch가 자세제어기의 PD제어기에 의해 목표 각도인 25°로 제어됨을 확인하였 다.

Fig. 45 Pitch control test using PD controller #1

Fig. 46 Pitch control test using PD controller #2

제 6 장 결론

6.1 결론 및 향후 과제

Collection

본 논문은 수중 글라이더에 추진기가 장착되어 에너지 절감과 자체 추진을 통한 정밀 경 로 탐색의 장점을 가진 하이브리드 수중 글라이더를 설계하기 위해 내부 질량과 부력 조절 장치 및 추진기의 수학 모델을 고려하여 동역학 모델링을 수행하였으며, 이를 바탕으로 하 이브리드 수중 글라이더의 설계하고 제작하였다.

정밀 경로 탐색을 위해 다중 센서 기반의 복합 항법 알고리즘을 개발하였으며, 이를 위해 선행적으로 항법에 Reference 센서로 사용되는 DVL과 GPS의 성능 시험을 수행하여 센서의 신뢰성과 특징을 확인하여 항법 알고리즘에 적용할 방안을 찾을 수 있었다. 그 후에 수조에 서 항법 알고리즘의 성능 시험을 실시하였으며 연산된 위치 정보가 실제의 위치 정보와 유 사함을 확인하여 구성한 항법장치 및 항법 알고리즘의 신뢰성을 확인하였다.

수중 글라이더의 추진력을 얻기 위한 장치인 자세제어기 및 부력엔진의 제어 시스템을 구 성하였으며, 성능을 확인하기 위해 시험을 진행하였다. 시험 결과 자세제어기는 약 0.1m/s, 부력엔진은 약 0.04m/s의 속도로 명령에 따라 정확한 목표 지점으로 이동하였으며, 약 0.1mm 단위로 동작이 가능함을 확인하였다. 이 시험을 통해 자세제어기 및 부력엔진의 정 및 제어 기술의 신뢰성을 확인하였다.

선체의 자세 제어 시험을 위해 선행적으로 부력엔진의 성능 확인 및 활강 Pitch를 측정하 는 시험을 진행하였다. 선자의 시험을 통해 부력엔진의 피스톤이 중립으로부터 약 65mm를 이동하였을 때 선체가 음성 부력이 되어 하향 활강하는 모습을 확인하였다. 또한 후자의 시 험을 통해 선체가 음성 부력 시에 자세제어기의 위치에 따른 Pitch를 확인하였다. 위의 두 시험 후 자세 제어 시험을 수행하였다. PD제어기를 설계하여 음성 부력인 선체의 자세제어 기를 정밀하게 제어하여 목표 Pitch가 25°가 되도록 제어하였다. 시험 결과 목표 각도로 선 체의 자세가 제어됨을 확인하였으며, 이를 통해 선체의 정밀 자세제어 시스템의 신뢰성을 확인하였다.

추후 제작된 하이브리드 수중글라이더의 특성을 활용하여 더 효율적인 자세 제어 알고리 즘을 연구할 것이며, 다른 수중 무인 로봇에 비해 상대적으로 느린 주행 속도를 가지는 수 중 글라이더의 특성과 추가된 추진기의 특성을 융합한 복합 항법 및 조류에 강인한 제어 알 고리즘에 대해 연구할 것이며, 또한 선체 중앙의 Payload에 현재 장착된 DVL 이외의

CTD(Conductivity-Temperature-Depth), Multi-beam, SSS(Side Scan Sonar), Current sensor 등 을 장착하여 해안의 상태를 감지 및 측정하는 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

먼저 석사 과정 동안 연구에 매진할 수 있도록 끊임없는 격려와 지도를 해주신 최형식 교 수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님은 제가 할 수 있는 이상의 것을 펼칠 수 있게 해주 셨고, 조언과 충고를 아끼지 않으셨습니다. 많은 가르침을 주시고 늘 응원해주시는 최형식 교수님이 계셨기에 석사 생활을 잘 마무리할 수 있었습니다. 그리고 바쁘신 가운데 저의 논 문 심사를 맡아주시고, 소중한 조언과 충고의 말씀을 해주신 정재현 교수님, 조용성 교수님 께 깊은 감사를 드립니다.

학부생시절 처음 연구실에 들어와 졸업하는 지금까지 2년 5개월의 시간이 자났습니다. 하 지만 이 기간이 제가 느끼기엔 정말 짧고도 빠르게 지나간 것처럼 느껴집니다. 처음에는 단 지 수중 로봇을 만들 수 있으면 참 멋지겠다는 생각으로 연구실에 들어와 연구실 생활을 시 작하였습니다. 긴 시간동안 많은 일들이 있었지만 지금과 같은 연구실 생활을 할 수 있었던 이유는 제 옆에서 도움을 주신 실험실 여러 선배님들과 동희형, 진일이형, 상기형, 지윤이 형, 형석이형, 성원이, 동욱이, Vu, Duc, 그리고 내 동기인 재현이와 현승이 덕분인 것 같습 니다. 지면을 통해서 언급하지 못한 분들을 포함하여 그동안 옆에서 많은 도움을 주셔서 감 사드립니다.

마지막으로 가슴 벅찰 만큼 행복한 이 세상을 알게 하시고, 보게 하시고, 느낄 수 있게 해주신 저의 부모님인 아버지, 어머니께 정말 감사드립니다. 거리는 멀리 떨어져 있었지만 항상 마음속으로 응원하시고 기도해주셨습니다. 그리고 저를 항상 믿어주고 제 앞길을 같이 고민하고 인도해준 윤희 누나는 무엇을 주어도 아깝지 않습니다.

사랑하는 가족들 감사드립니다.

2016년 1월 10일

지 대 형

참고문헌

- 김기훈, 2005. 무인잠수정 SNUUV I의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석. 박사학위 논문. 서울;서울대학교
- 박요섭 등, 2012. 수중 글라이더를 이용한 동해 횡단 사례 보고. 한국해양학회지, 17(2), pp.130-137.
- 박종진, 2013. 해양 글라이더에 관하여:한국 근해에서의 적용 가능성. Ocean and Polar Research, 35(2), pp.107-121.
- 신동협, 배서롱, 백운경, & 주문갑, 2013. 퍼지 PD 제어기를 사용한 자율 무인 잠수정의 경 유점 추적. 한국정보기술학회논문지, 11(5), pp.1-7.
- 정상기 등, 2015. 고속 무인 수중글라이더의 설계 및 제어 연구. 2015년도 한국해양과학기술 협의회 공동학술대회
- 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)
- Fiorelli, E. et al., 2006.Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 31(4), pp.935–948.
- Leonard, N.E. et al., 2010. Coordinated Control of an Underwater Glider Fleet in an Adaptive Ocean Sampling Field Eweriment in Monterey Bay. Journal of Field Robotics, 27(6), pp.718-740.
- Maybeck, P.S., 1996. Stochastic Models, Estimation, and Control:Vol.1. Academic Press Inc:New York.
- 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.
- 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.

Collection

- Smith, R.N. et al., 2011. Persistent Ocean Monitoring with Underwater Gliders: Adapting Sampling Resolution. Journal of Field Robotics, 28(5), pp.714–741.
- 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.

A. Schematic of Attitude control board

- 58 -

C. Schematic of Power switching

