



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

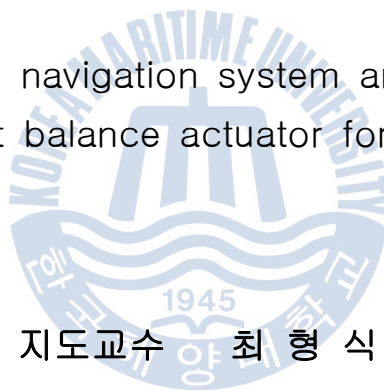
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

Weight balance actuator를 이용한 KAUV 항법 및 전장 시스템 개발

Development of navigation system and control using
weight balance actuator for KAUV



지도교수 최 형 식

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

백 세 훈

本 論文을 白世勳의 工學碩士 學位論文으로
認准함.

위 원 장 유 삼 상 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 조 종 래 (인)

2014 년 2 월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

그림목차

표목차

제 1 장 서론.....	1
제 2 장 KAUV의 기구부 구성.....	3
2.1KAUV 선체 구조.....	3
2.2추진기 설계.....	4
제 3 장 Weight Balance Actuator.....	6
3.1Weight Balance Actuator 구성.....	6
3.2무게 선정 시험.....	7
3.2Weight Balance Actuator 제작 및 성능실험.....	8
제 4 장 KAUV의 전장설계.....	10
4.1하드웨어 구성.....	11
4.2전장 및 모터부 전원 구성.....	17
4.3위치 제어 알고리즘.....	20
4.4KAUV GUI 개발.....	26
제 5 장 KAUV통합 항법 개발.....	28
5.1좌표계.....	28
5.2항법시스템 제작.....	33
5.2.1항법 및 센서 성능.....	33
5.2.2The Extended Kalman Filter.....	37
5.2.3DVL 성능실험.....	38
5.2.4항법장치 구성.....	41
5.3항법시스템의 성능시험.....	43
5.3.1수상항법시스템.....	43
5.3.2수중항법시스템.....	45
5.3.3복합항법 장치 성능 시험.....	50
제 6 장 결론.....	53
참 고 문 헌.....	55

Development of navigation system and control using weight balance actuator for KAUV

BAEK SE HOON

Department of Mechanical Engineering

*Graduate School of
Korea Maritime University*

Abstract

This paper presents an architecture of a newly developed autonomous underwater vehicle (AUV) platform, named KAUV, which is designed as a torpedo with very light weight and small size, suitable for use in marine exploration and monitoring.

The KAUV is equipped with a mass shifter mechanism inside to make changes of the vehicle center of gravity from which the pitch angle and depth of the vehicle could be controlled. The paper will propose a new depth control strategy for the KAUV. The feasibility of the proposed control strategy is validated through test of performance of the vehicle.

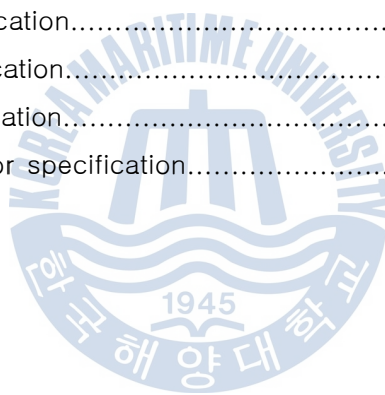
그림 목 차

Fig. 2.1 Shape of the KAUV.....	3
Fig. 2.2 Exploded view of the KAUV.....	3
Fig. 2.3 Changeable actuator.....	4
Fig. 2.4 Underwater propulsion.....	5
Fig. 3.1 Weight balance actuator of the KAUV.....	6
Fig. 3.2 Weight selection test.....	7
Fig. 3.3 Angle variation of depending on weight position.....	7
Fig. 3.4 Photo of weight balance actuator.....	8
Fig. 3.5 Developed weight balance actuator.....	8
Fig. 3.6 Developed weight balance actuator.....	9
Fig. 3.7 Control result in pitch angle.....	9
Fig. 4.1 General arrangement of the KAUV.....	10
Fig. 4.2 Embedded system-IEC 667 Lite.....	11
Fig. 4.3 RF Module(24XStream).....	12
Fig. 4.4 BLDC Motor & Driver.....	13
Fig. 4.5 Motor Driver & Controller.....	14
Fig. 4.6 The circuit of motor driver.....	15
Fig. 4.7 Lithium Polymer battery.....	15
Fig. 4.8 Communication composition of KAUV	17
Fig. 4.9 H/W power system.....	18
Fig. 4.10 Motor part power system.....	19
Fig. 4.11 The circuit of motor controller.....	20
Fig. 4.12 Motor control system.....	21
Fig. 4.13 Trapezoidal velocity profile.....	22
Fig. 4.14 GUI program of KAUV.....	26
Fig. 4.15 KAUV Block Diagram.....	27

Fig. 5.1 Navigation coordinate.....	28
Fig. 5.2 Body coordinate.....	29
Fig. 5.3 GPS, Antenna.....	33
Fig. 5.4. DVL.....	34
Fig. 5.5 IMU.....	35
Fig. 5.6 Depth Sensor.....	36
Fig. 5.7 The operation of the extended Kalman filter.....	37
Fig. 5.8 DVL Experiment equipment of DVL.....	38
Fig. 5.9 DVL test bed.....	38
Fig. 5.10 The fixed part for DVL.....	39
Fig. 5.11 DVL law data comparing with an adapted EKF data at velocity 0.3m/s.....	40
Fig. 5.12 Configuration of navigation board.....	41
Fig. 5.13 Navigation Controller(DSP 28335).....	42
Fig. 5.14 Navigation board.....	42
Fig. 5.15 Navigation system.....	43
Fig. 5.16 H/W composition of navigation system at surface.....	44
Fig. 5.17 S/W composition of navigation system at surface.....	45
Fig. 5.18 AUV navigation system.....	46
Fig. 5.19 H/W composition of navigation system at underwater.....	46
Fig. 5.20 S/W composition of navigation system at underwater.....	49
Fig. 5.21 Test result at 3000RPM, rudder angle 30°.....	49
Fig. 5.22 Trajectory at 45 degree.....	50
Fig. 5.23 Trajectory of KAUV.....	50
Fig. 5.24 Depth control of KAUV.....	51
Fig. 5.25 Trajectory of KAUV.....	51
Fig. 5.26 Trajectory of KAUV.....	52

표 목 차

Table. 4.1 Specification of Embedded system-IEC 667 Lite.....	11
Table. 4.2 Specification of RF Module.....	12
Table. 4.3 Specification of BLDC Motor Driver.....	13
Table. 4.4 Specification of Lithium Polymer battery.....	16
Table. 5.1 GPS specification.....	34
Table. 5.2 DVL specification.....	35
Table. 5.3 IMU specification.....	36
Table. 5.4 Depth sensor specification.....	37



1. 서론

무인잠수정 (AUV)는 해양 공익, 해양탐사 및 수중관측, 해양방위산업 분야 등 광범위하게 적용되어 세계의 많은 연구자들의 관심을 받고 있는 연구 주제이다. 현재 까지 AUV에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나 수중에서 경로의 정확성뿐만 아니라, 장시간의 운용 시간 및 통신 등의 연구가 더욱 필요한 중요한 분야가 있다. 이미 북미에서는 수많은 AUV 플랫폼을 개발하여 왔고 최근에 대표적으로 활용되고 있는 것으로 REMUS 시리즈가 있다[1][2]. 국내에서도 대우조선해양의 옥포 6000을 필두로 해양연구원의 이십이, 삼성탈레스의 보토 등을 최근에 개발하였다.

무인잠수정은 수중으로 전파가 통과하지 못함으로 인해 GPS(Global positioning system) 센서를 이용하여 위치의 관측이 불가능하다. 이 때문에 LBL(Long baseline), SBL(Short baseline), USBL(Ultra short baseline), DVL(Doppler Velocity Log) 등의 초음파 관측시스템을 이용이 필요로 한다[3]. 하지만, 이들 초음파 센서는 시간이 지남에 따른 위치 오차의 발산은 없지만, 고주파수의 위치 오차가 있으며 수중에서의 초음파 전달특성으로 말미암아 긴 시간 간격의 샘플링 주기를 가진다. 일반적인 수중항법으로 LBL이 많이 이용되나, 센서를 해저에 설치하는 번거로운 작업과 센서 설치 범위를 벗어난 영역에서의 항법이 곤란한 단점이 있다. USBL은 사용이 편리하고 이동형 무인잠수정을 추적하며 모니터링 하기에는 용이하나, 측정거리가 늘어나면 수중 운항제어에 사용하기에 곤란하다. 이에 따라 관성 센서와 초음파 센서 및 GPS 센서를 융합하는 복합항법시스템이 요구된다.[4][5][6][7]

관성항법 시스템은 단시간의 운항에서는 매우 정밀한 정보를 제공할 수 있지만 관성 센서의 바이어스 오차 때문에 항법정보를 구하기 위한 적분 과정에서 센서 측정 데이터에 포함된 바이어스 오차가 시간이 지남에 따라 기하급수적으로 증가하여 오차가 발생한다. 이러한 관성항법시스템의 단점을 극복하고 성능을 향상 시키기 위하여, 비관성 센서인 GPS, 심도계(Depth gauge), 도플러 속도센서(Doppler velocity), 경사계(Clinometer), 지자기 센서(Geomagnetic sensor), USBL, LBL, SBL을 보조센서로 활용하는 보조항법시스템을 개발하는 것이 필요하다.[8]

앞서 이야기 했던 대우조선해양의 옥포 6000, 해양연구원의 이십이, 삼성탈레스의 보포 이들 대부분의 AUV들은 고정 추진체와 핀이나 러더 등을 제어하여 위치와 방향을 제어하고 있다. 하지만, 핀으로 제어를 할 경우 저속에서는 심도제어가 어려운 단점과 고속에서는 핀 자체가 운행에 저항체로 작용하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수직 스러스트를 설치하여 심도제어를 하는 구조의 옥포 300이 대우조선해양에 의해 개발되기도 하였다.[9]

본 연구에서는 원하는 목표 위치로의 항행과 weight balance를 이용하여 수심제어가 가능한 새로운 구조의 KAUV라 칭하는 AUV에 대한 연구를 하였다. KAUV를 동작 시키기 위해 배터리를 이용한 전장시스템을 구성하였고 KAUV 내부에는 많은 센서들과 모터를 사용하고 있기 때문에 DC/DC 컨버터를 이용하여 전기적 노이즈를 많이 발생 시키는 모터와 센서간의 전원을 분리하여 전원 노이즈를 줄였다. 그리고 모터를 제어하기 위해 정밀제어가 필요한 부분에는 모터 드라이버를 자체 제작하여 사용하였고 정밀제어가 필요하지 않는 부분에는 상용 모터 드라이버를 사용하여 전장시스템을 구축하였다. IMU 센서에서 나오는 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 센서와 GPS, DVL을 보조항법 시스템으로 이용한 항법시스템에 대하여 연구하였다. 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 센서로 얻어진 데이터는 노이즈를 포함하여 이를 제거하기 위해서 칼만 필터를 이용하여 동체의 위치와 자세 값을 추정하며, 비교적 정확한 DVL과 GPS 측정 신호를 바탕으로 이들 신호를 갱신하여 상태변수를 보정하여 항법 및 제어시스템을 구성하였다. 그리고 여러 센서 데이터와 칼만필터를 이용해서 얻은 동체의 위치와 자세 값을 이용하여 KAUV의 운항 및 심도 제어에 대한 실험을 하고 그 결과를 소개하였다.

2. KAUV 기구부 구성

2.1 KAUV 선체 구조

KAUV는 선체 길이 1.572 m, 최대 직경은 0.18 m이다. Fig. 2.1의 KAUV는 최대 200 m의 수심에서 작동이 가능하고 압력센서, IMU, DVL, GPS, 추진 시스템, 러더, weight balance actuator, 센서, 전원 공급 장치, 통신 및 네비게이션 시스템을 포함하고 있다. KAUV가 수중에 떠있게 하기 위해 실제 무게 23.4 KGF보다 약간 큰 23.8 KGF의 부력을 가진다. 부력의 중심은 KAUV 중심선에 무게 중심보다 높은 위치에 둬므로 안정 적이게 된다. 또한 안정성을 향상시키기 위해 세 개의 고정 된 rudder를 후방에 120도 간격으로 설치 시켰다. KAUV



Fig. 2.1 Shape of the KAUV

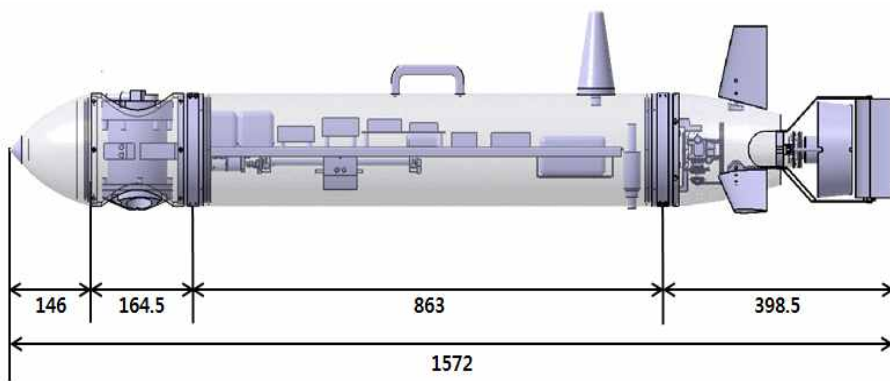


Fig. 2.2 Exploded view of the KAUV

의 내부 구성은 Fig. 2.2에 표시된다.

Fig. 2.2에서 보는바와 같이 KAUV 후면부에 1개의 추진기와 yaw제어를 위한 rudder 모터 그리고 KAUV 중심부에 수심제어를 위한 weight balance 모터 이렇게 3개의 모터를 사용하여 추진특성 해석을 행하였고 이를 바탕으로 3축 제어가 가능한 KAUV를 구성하였다.

2.2 추진기 설계

기존의 수중로봇은 1개의 추진기와 후면부에 위치한 4개의 러더를 이용하여 방향제어 및 수심제어를 하였지만 KAUV는 기존의 수중로봇과는 다르게 전방 추진을 위한 추진기와 방향 제어를 위한 프로펠러 뒤에 위치한 rudder, 수심 제어를 위한 weight balance actuator를 갖는 형태의 KAUV를 제작 하였다.

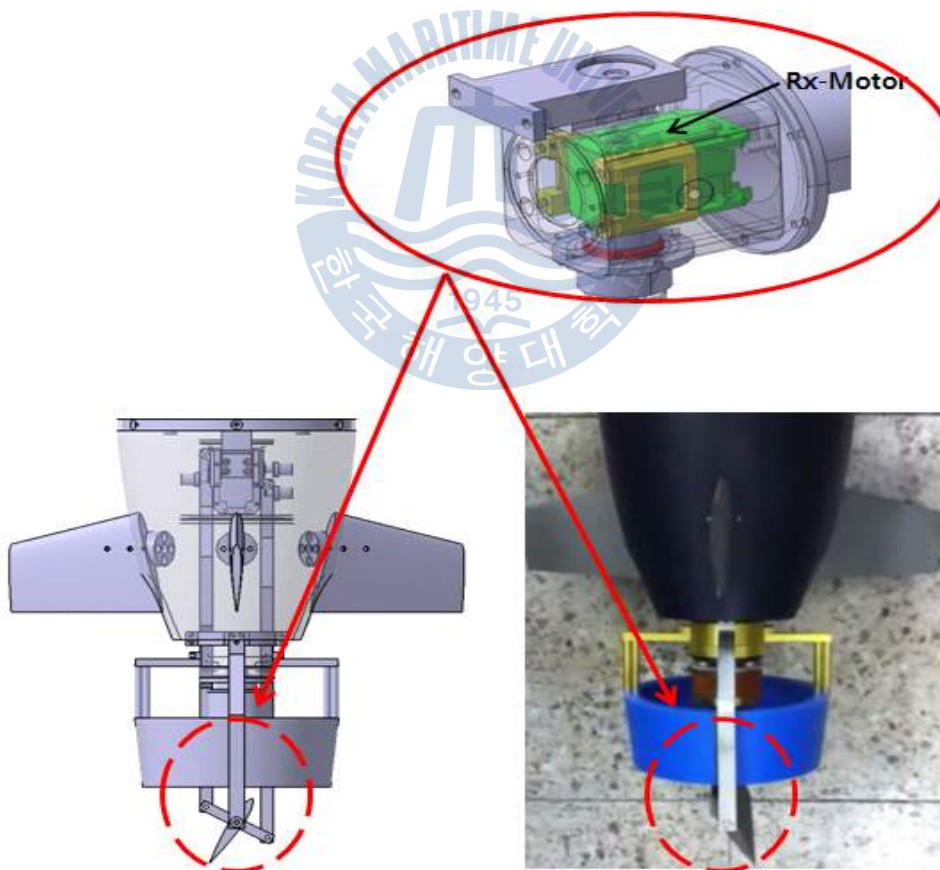


Fig. 2.3 Changeable actuator

FIG. 2.3은 가변 액추에이터이고 사용된 모터로는 다이낙셀의 RX28 모터를 사용 하였습니다. rudder의 좌우 최대 회전 각도는 30도 이며 전방 추진 시 프로펠러에서 나오는 유체의 흐름을 바꿈으로써 방향 제어를 가능하게 설계 하였다. rudder의 동작 원리로는 가변 액추에이터의 모터가 회전 운동을 가지게 되면 모터에 연결된 두 개의 링크가 회전운동을 병진운동으로 동력을 변환시켜 링크 끝단에 연결된 rudder를 구동시켜 KAUV의 방향각을 제어하게 된다.

KAUV에서 사용된 수중 추진기는 MAXON BLDC 200W급 모터를 이용하여 설계 되었다. 모터의 방수를 위해 2중 O링 구조의 방수 실린더를 제작하였고 실린더와 프로펠러를 완전 분리하였다. 프로펠러의 동력전달 원리로는 실린더 내부에 모터를 고정하고 모터 샤프트 끝단에 마그네틱 커플링을 부착하여 커플링이 회전하면 실린더 외부에 결합되어 있는 프로펠러(영구자석)이 회전하여 동력을 발생시키게 된다. 이렇게 마그네틱 커플러를 이용하여 반영구적으로 방수가 가능한 추진체를 설계 및 제작하였다. 최대 회전속도는 2833rpm이며 토크는 19.08Nm 이다. 수중추진기는 가변 액추에이터와 연결되어 있어 전방추진력 뿐만 아니라 가변 액추에이터의 링크에 연결되어 있는 rudder를 회전시켜 KAUV의 heading 제어를 한다.

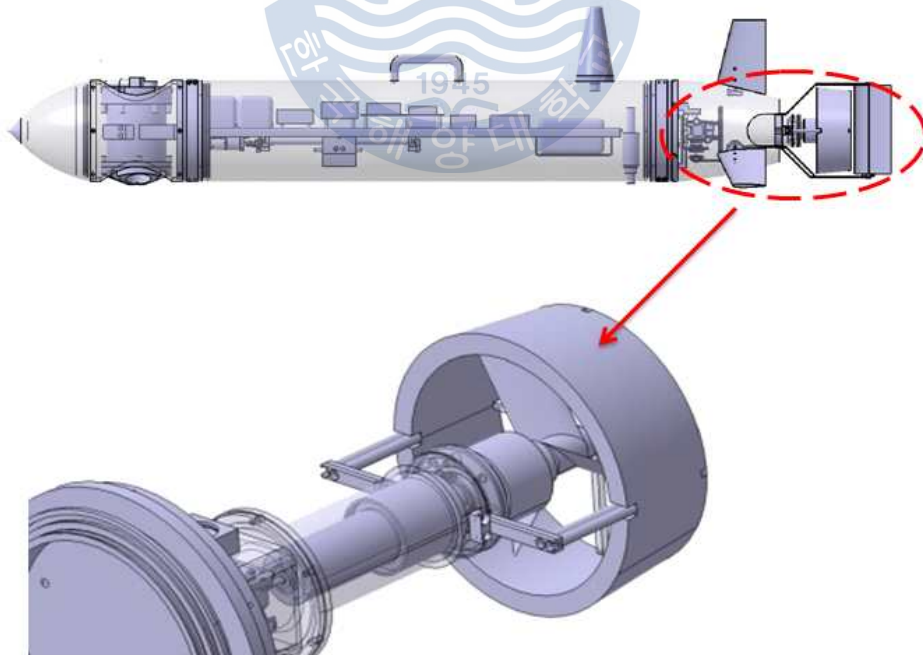


Fig. 2.4 Underwater propulsion

3. Weight Balance Actuator

3.1 Weight Balance Actuator 구성

Fig. 3.1은 깊이를 제어하기 위한 weight balance actuator이다. 본 연구에서 개발된 KAUV는 기존의 스텐을 제어하여 깊이를 제어하는 것과는 다르게 weight balance actuator는 LM guide를 actuator로 구성하였고 24V모터로 구동이 되며 Fig. 3.1과 같이 LM guide에 질량이 고정되어 guide를 따라 질량이 이동되게 되고 질량이 이동됨에 따라 KAUV의 무게중심이 앞으로, 뒤로 이동하게 된다. 이렇게 무게중심이 앞으로, 뒤로 이동되게 되면 KAUV의 pitch angle 값이 변하게 되어 수심제어가 가능하게 된다. 또한 최초 전원을 인가하였을 경우 모터가 회전하여 weight를 이동시키게 되고 weight balance actuator 끝단에 포토 센서를 부착하여 질량이 허용된 범위를 넘어서는 것을 막아줄 뿐만 아니라 그 지점을 초기 값으로 인식하고 모터에 부착된 엔코더 값의 계산을 통하여 전체 길이를 계산한 후에 weight를 정 가운데 위치시키게 된다. weight balance actuator 최대 이동속도는 30mm/s이고 이동거리는 200mm이다. 무게추의 무게는 현재 KAUV가 실험 단계이기 때문에 가볍게 제작하였다.

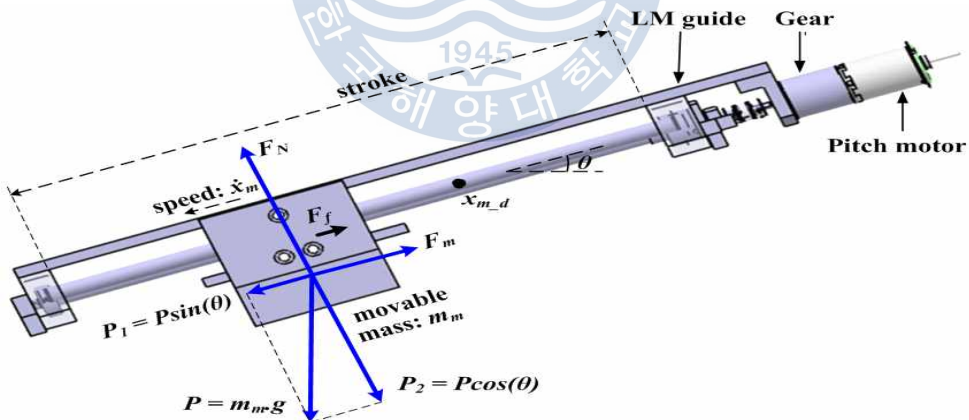


Fig. 3.1 Weight balance actuator of the KAUV

3.2 무게 선정 시험

weight balance actuator를 이용하여 수심 제어하기 위해서는 Pitch 제어가 가능한 actuator의 무게를 선정하여야 했다. Fig. 3.2은 전장구성을 끝낸 후 KAUV의 자체무게가 고정인 다음 KAUV를 수조에 넣고 KAUV 무게 중심을 기준으로 weight의 이동 제한을 20cm의 길이 제한을 둔 다음 5cm 간격으로 weight를 이동 시키고 weight를 2.5kg, 3.5kg, 5kg로 변화 시켰으며 Fig. 3.3은 각각의 무게 별, 길이별 KAUV의 Pitch데이터이다.



Fig. 3.2 Weight selection test

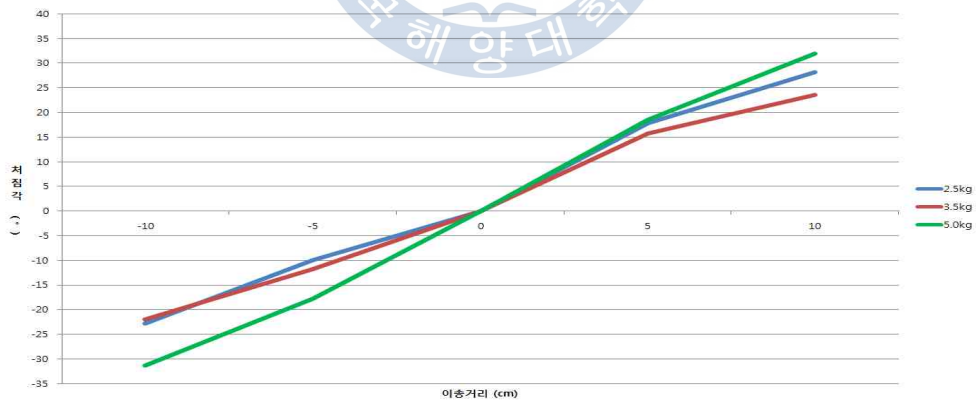


Fig. 3.3 Angle variation of depending on weight position

3.3 weight balance actuator 제작 및 성능 실험

Fig. 3.3의 실험 결과로 2.5kg, 3.0kg, 3.5kg 무게에 따른 각도 변화가 크지 않으므로 KAUV의 선체 무게를 최소한으로 하기 위하여 weight를 2.5kg로 선정하였다. Fig. 3.4는 weight balance actuator의 설계 도면 및 실제 제작 사진이고 Fig. 3.5은 전장 시스템을 구성하고 KAUV에 실제로 부착한 사진이다.

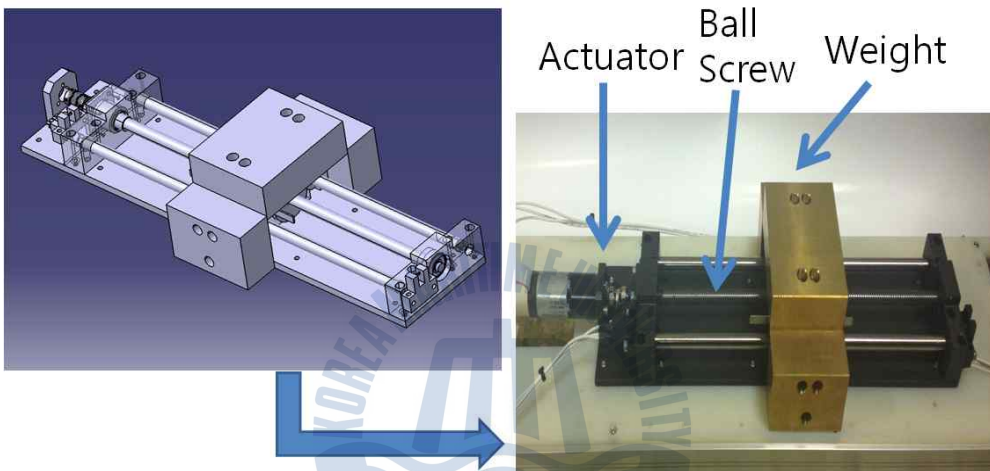


Fig. 3.4 photo of weight balance actuator

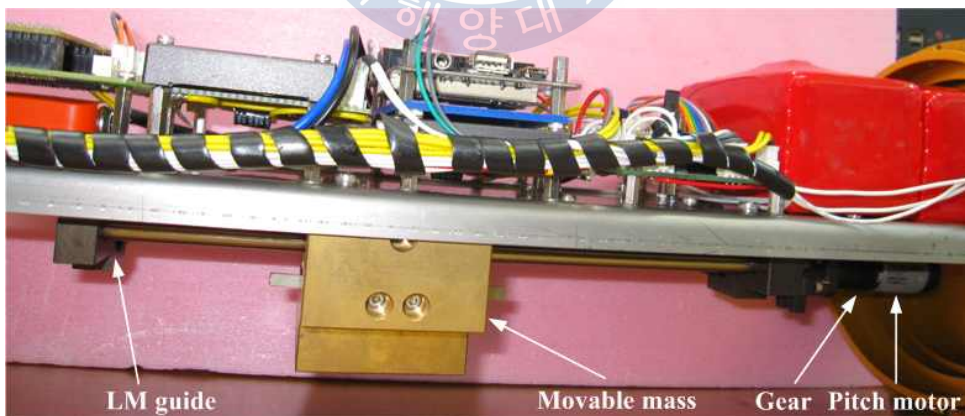


Fig. 3.5 Developed weight balance actuator

Fig. 3.6은 weight balance actuator를 KAUV 내부에 장착하여 가로 4m, 세로 10m 높이 5m 실내 수조에 과 같이 KAUV 부력을 음성부력으로 맞춘 상태에서 크레인으로 KAUV를 물속에 고정한 사진이며 Fig. 3.7의 왼쪽 그림부터 weight balance actuator의 중심을 기준으로 weight를 전방으로 9cm 후방으로 9cm 이동하였을 때 KAUV가 수심에서 기울어지는 pitch 각도와 도달 시간을 측정하였고 후방으로 weight를 이동 시켰을 때는 6초 만에 67도가량 기울어 졌고 전방으로 weight를 이동 시켰을 때도 6초 만에 -65도 가량 기울어 진 것을 볼 수 있으며 weight를 전방 또는 후방으로 이동시켰을 때 Fig. 3.7을 통해 유사한 성능을 가지는 것을 볼 수가 있다.



Fig. 3.6 Developed weight balance actuator

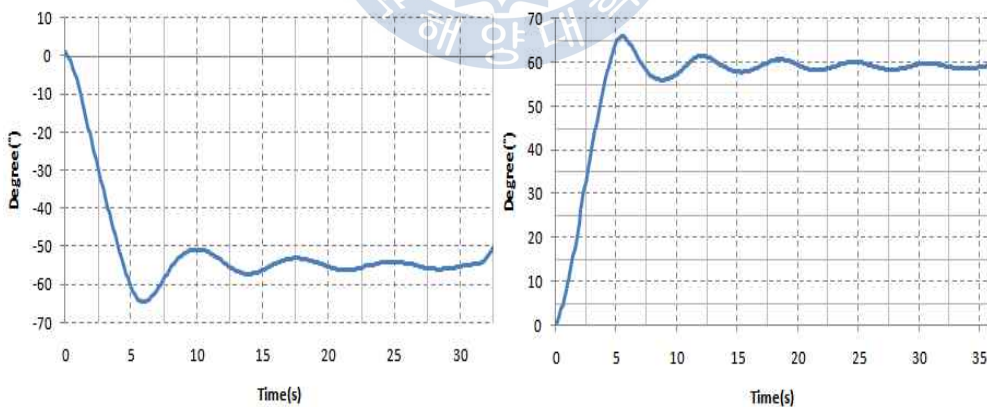


Fig. 3.7 Control result in pitch angle

4. KAUV의 전장설계

Fig. 4.1은 KAUV의 내부 센서 및 하드웨어 배치도이다. DVL은 선수부에 부착하였고 IMU는 중앙부에 덤스센서는 후면부에 위치해 있으며 총 3개의 배터리팩이 들어가며 전방부에 10A용 배터리 하나 후방부에 5A용 배터리 두 개가 들어간다. 중앙부에는 임베디드 컴퓨터와 모터 드라이버, 항법 보드, 센서 보드, weight balance actuator, 5개의 DC/DC가 부착되어 있으며 선미부에는 추진기와 가변 액추에이터를 장착하였다.

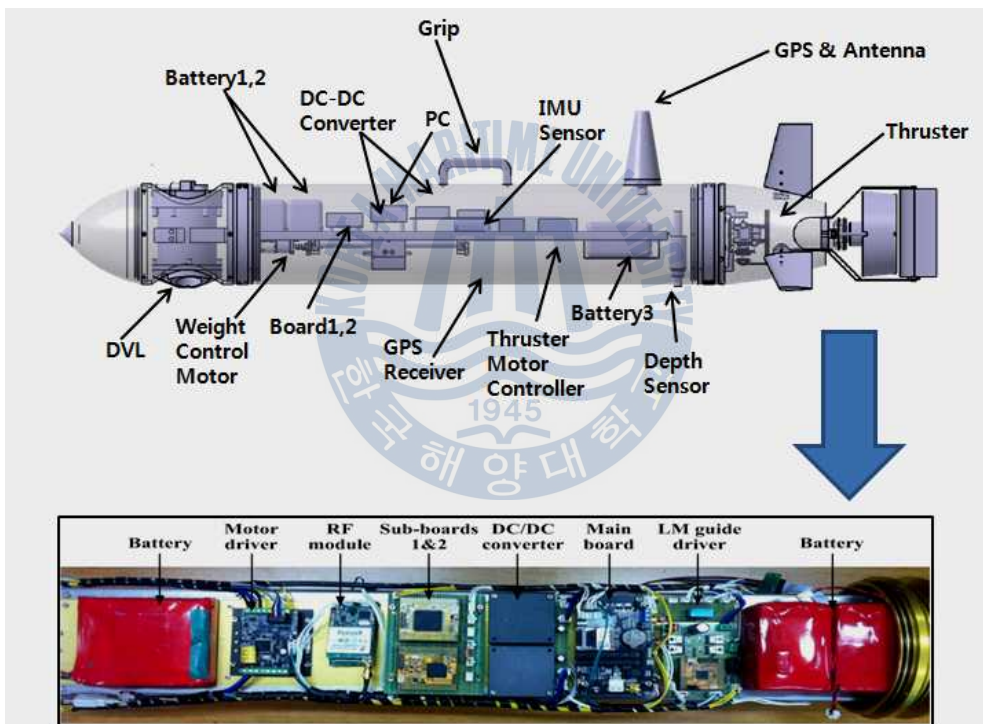


Fig. 4.1 General arrangement of the KAUV

4.1 하드웨어 구성

KAUV의 내부에는 메인 제어기와 보조 제어기가 2개가 들어가게 된다. 메인제어를 위해 임베디드 컴퓨터(Fig.4.2)를 사용하여 KAUV를 제어 하였다. 임베디드 컴퓨터는 Windows CE 6.0 기반으로 사용자가 쉽게 효율적으로 시스템의 성능을 설정할 수 있고, 쉽게 운용 알고리즘을 교체할 수 있기 때문에 C#을 통하여 GUI 프로그램을 구성한 후 임베디드 컴퓨터에 프로그램을 설치했다. 임베디드 컴퓨터의 제원은 Table. 4.1과 같다.

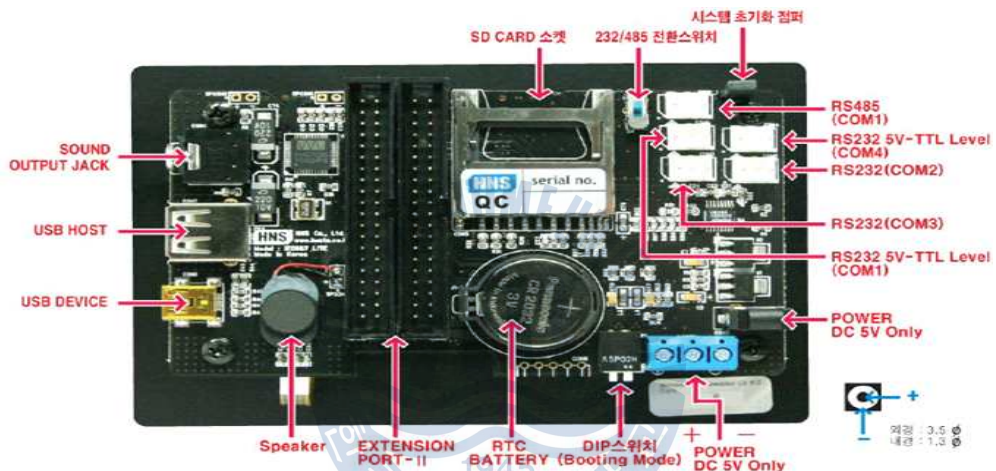


Fig. 4.2 Embedded system-IEC 667 Lite

		IEC667Lite	
System	CPU	32Bit RISC ARM1179JZF - 667MHz	
	RAM	256MB	
	Flash	NAND Flash : 128MB(OS : 50MB/Storage : 78MB	
	SD Memory	SD Support	
	RTC	RTC containing	
	전원	DC 5V	
	동작 온도	-10 ~ 60℃	
Communication	RS232	2 ch	4 ch
	RS485	1 ch	
	TTL	1 ch	
	USB Host	1 ch - USB1.1	
	USB Device	1 ch - USB2.0	
	Ethernet	10 Mbps	

Table. 4.1 Specification of Embedded system-IEC 667 Lite

Fig. 4.3은 사용자 컴퓨터로부터 KAUV에 임무전달은 RF통신을 통하여 전달한다. KAUV가 수면위에 있을때는 안테나가 외부에 노출되어 RF통신이 가능하기 때문에 실시간으로 KAUV의 정보를 사용자 컴퓨터로 전송하여 KAUV의 상태 및 센서의 데이터를 실시간으로 확인 및 제어 할 수 있다. RF 모듈 통신 주파수는 2.4GHz이며 최대 통신거리는 16Km이다. RF 모듈의 자세한 제원은 Table. 4.2와 같다.



Fig. 4.3 RF Module(24XStream)

24XStream	2.4 GHz
Performance	
Power Output:	50 mW (17 dBm)
Indoor/Urban Range:	up to 600' (180m)
Outdoor/RF Line-of-sight Range:	up to 10 miles (16 km)
Receiver Sensitivity:	-105 dBm (@ 9600 bps)
Power	
Supply Voltage:	5 VDC regulated (± 0.25 V)
Transmit Current:	150 mA
Receive Current:	50 mA
General	
Frequency Band:	2.4000 - 2.4835 GHz
Serial Data Interface:	5V CMOS UART - No configuration required

Table. 4.2 Specification of RF Module

본 연구에서 전방 추진체 모터는 200W급 4-pole BLDC Motor을 적용하였다. 기어비 6:1, 토크 19.08Nm 최대 속도 2833RPM으로 이를 구동 하기위해 로보 큐브사의 400W BLDC모터 드라이버를 적용하였다. 로보 큐브사의 모터드라이버 내부에 모터의 위치제어와 속도제어를 위한 알고리즘이 내장되어 있어 실제 추진기의 속도 제어시 모터 컨트롤러를 통하여 제어 명령을 전달하면 된다. Fig. 4.4는 실제 추진체 제어에 사용되는 모터 드라이버 사진이며 오른쪽은 BLDC 모터 사진이다. 모터드라이버의 제원은 Table. 4.3과 같다.



Fig. 4.4 BLDC Motor & Driver

SECTION	DETAILS		SPECIFICATION
MOTOR	Number of motor driver		1 ea
ELECTRICAL	Minimum supply voltage		10 V
	Nominal supply voltage		24/36/48 V
	continuous current		46 A
	continuous Power		300/440/600 W
	PWM frequency		20 ~ 83 KHz
	motor coil driving MOSFET		GWM 160 Module
OPERATION MODE	speed control	speed range	0 ~ 30000 RPM
		period of real-time speed command	2 ~ 100 ms
		acceleration/deceleration set	0
SENSOR	encoder		0
	analog hall sensor		0
INPUT/OUTPUT	analog input of digital I/O or fault output		3 ea

COMMUNICATION	RS232 speed	9600 ~ 115200 bps
	RS485 speed	upto 1.25 Mbps
	CAN speed	upto 1 Mbps
TEMPERATURE	operating ambiedt temperature	-20 ~ 50°C
MECHANICAL	dimension	80×50×21 mm(L×W×H)
	wight	46g

Table. 4.3 Specification of BLDC Motor Driver

Weight Balance Actuator를 구동하기 위하여 H브릿지를 이용한 DC Motor Driver를 개발 하였다. DC Motor Driver는 Fig. 4.5와 같이 제어부로 구성되는 motor controller와 파워 증폭 부로 구성되는 motor driver 두 부분으로 나뉜다. 제어 부는 일반적으로 마이크로프로세서로 구성되어 모터의 엔코더 신호를 받아 파워 증폭부에 보낼 PWM 및 모터 구동 방향 신호를 생성하는 역할을 한다. 파워 증폭부는 모터 드라이버를 말하며 제어부로부터 받은 PWM 및 방향 신호를 모터 구동 전원으로 신호를 증폭하여 모터의 전력을 공급한다. Fig. 4.6은 모터 드라이버 파워 증폭부의 회로도이다.

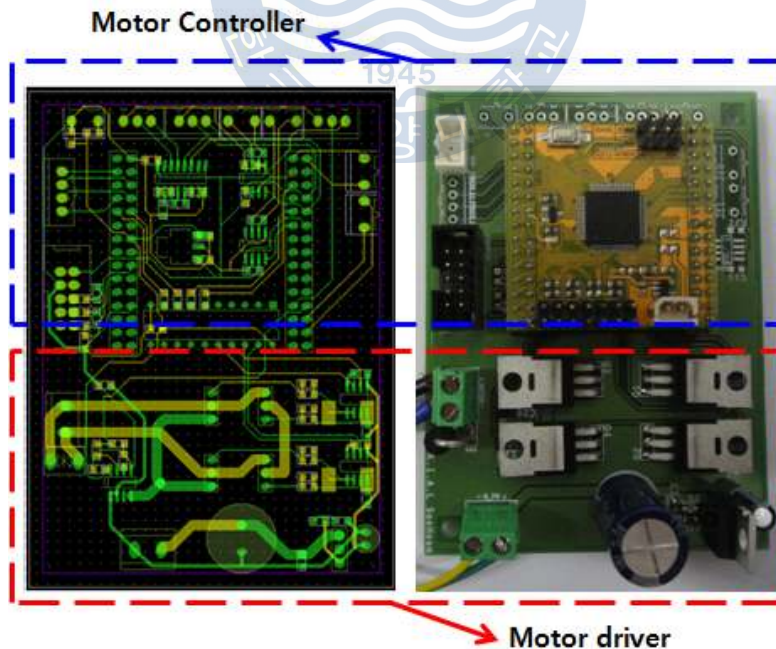


Fig. 4.5 Motor Driver & Controller

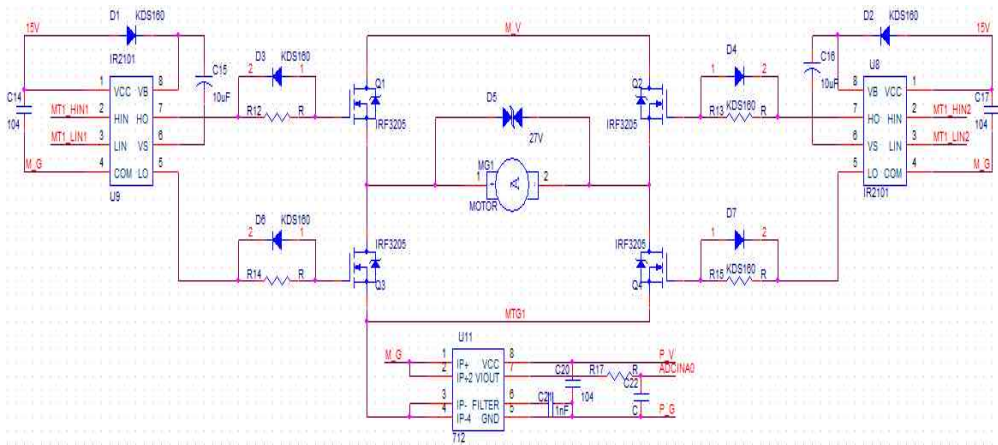


Fig. 4.6 The circuit of motor driver

전원 공급용 배터리는 리튬폴리머 5.3Ah, 7셀로 구성되어 총 3개의 배터리를 사용하였다.

KAUV에서 소모하는 전력을 325W이다. 선정된 배터리로 KAUV를 구동시 1시간 30분 동안 운항이 가능한 전력이다. 일반적으로 KAUV의 출력을 최대로 운항하는 시간이 길지 않기 때문에 80%의 출력으로 지속적으로 운항 한다고 가정하면 2시간 이상 KAUV의 운영이 가능하다. Fig. 4.7은 5A 배터리 실제사진이며 배터리 제원은 Table. 4.4와 같다.

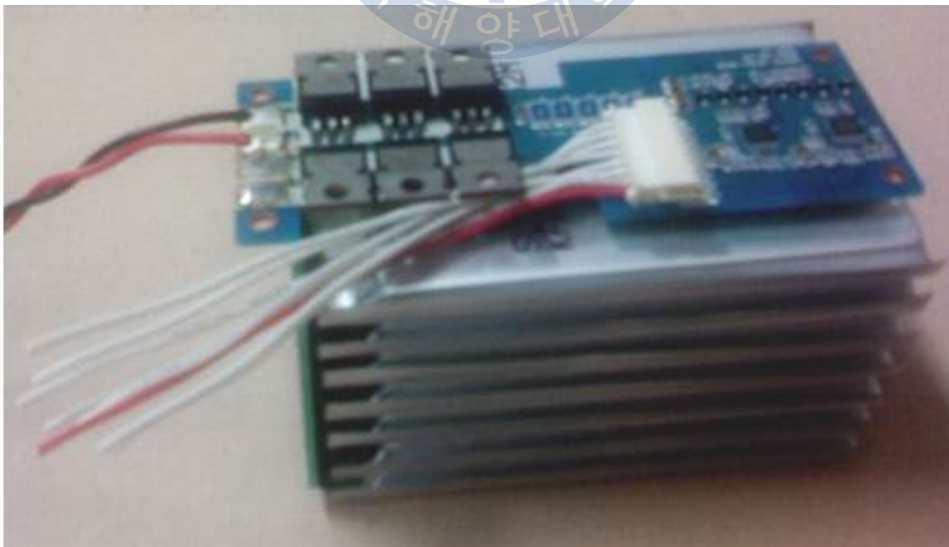


Fig. 4.7 Lithium Polymer battery

Rated Capacity		Typ. 5,300mAh
Nominal Voltage		3.7V
End Of Discharge		3.0V
Max. Charge Voltage		4.2V±0.03V
Max. Conti. Charge Current		10.6A
Max. Conti. Discharge Current		10.6A
Operation Temperature Range	charge	0 ~ 45°C
	Discharge	-20 ~ 55°C
Storage Temperature Range	1 Year	-20 ~ 25°C
	3 Month	25 ~ 40°C
	1 Week	40 ~ 60°C
Weight		102g
Cell Dimension	Length	Max.97.5mm
	Width	Max.64.5mm
	Thickness	Max.7.8mm

Table. 4.4 Specification of Lithium Polymer battery



4.2 통신 및 모터부 전원 구성

KAUV에서 RS-232통신을 사용하는 장치는 DVL, IMU, GPS, 항법보드, 임베디드 컴퓨터, 모터 컨트롤러, RF Module이다. KAUV의 가변 액추에이터를 구동은 RX-28모터를 통해 구동되어 진다. RX-28모터는 RS-485통신을 통해 구동된다. RS-485통신은 Half Duplex 방식으로 송신과 수신을 같은 회선을 사용하므로 한 쪽이 송신하면 다른 한쪽은 수신 할 수밖에 없다. 수중 추진체의 모터 제어를 위한 BLDC Motor Driver의 구동명령은 RS-232통신을 통하여 이루어진다. KAUV의 통신 구성은 Fig. 4.8과 같고, 센서와 항법 보드 간의 통신에는 RS-232, 그리고 항법보드, 임베디드 컴퓨터, 모터 컨트롤러 간의 통신도 RS-232통신을 이용한다. 가변 추진체는 RS-485 통신을 통하여 구동된다.

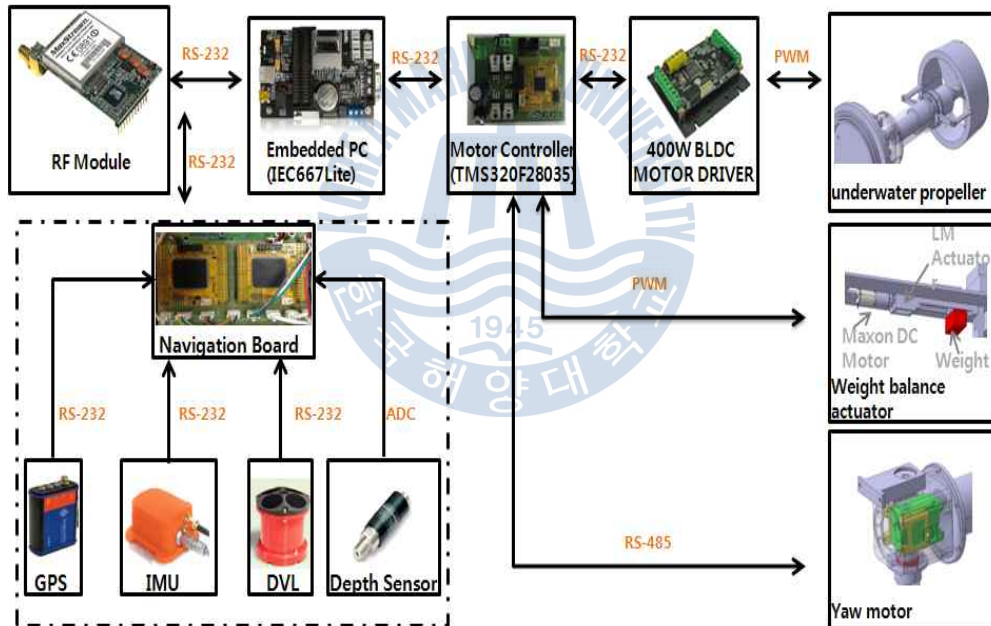


Fig. 4.8 Communication composition of KAUV

전장부에 사용된 배터리는 25.9V, 5.3Ah로 1개의 배터리를 이용하여 전장부에 전원을 공급하였다. 배터리의 특성상 전원을 사용할수록 전압이 떨어진다. 안정적으로 센서에 전원을 공급하기 위해 DC/DC를 거쳐 전장부에 전원을 공급하였다. DVL과 Depth sensor의 경우 24V구동이기 때문에 100W급 24-24 DCDC를 통하여 전원공급을 하였고, 전장부의 전원은 60W급 24-5 DC/DC로 연결하여 IMU, GPS, RF Module, 임베디드 컴퓨터, 항법보드, 모터 컨트롤러에 5V를 공급하였다.

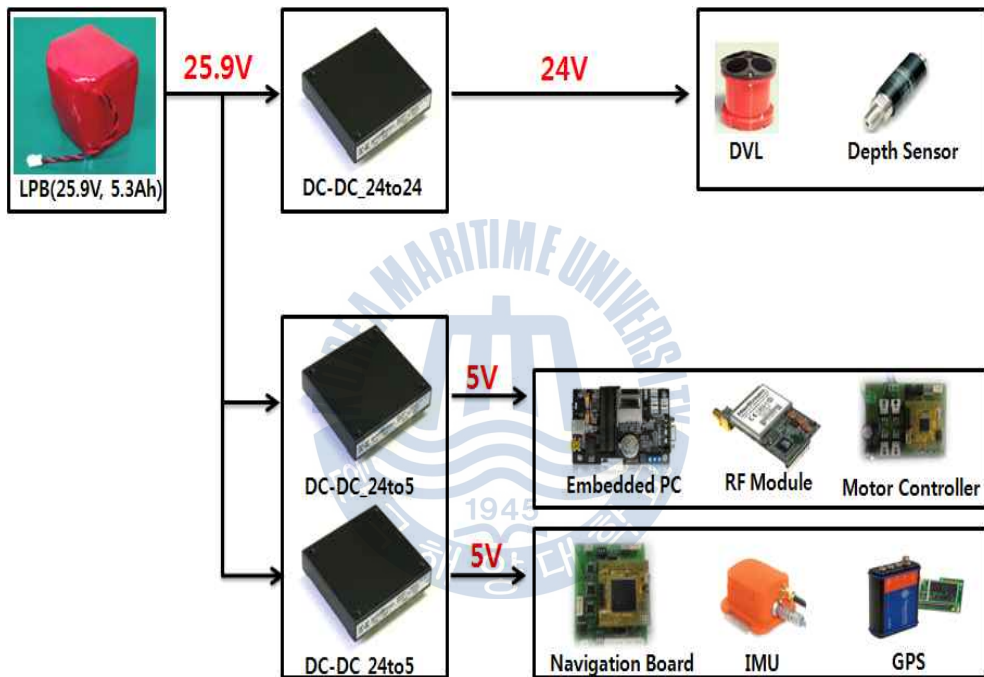


Fig. 4.9 H/W power system

모터부의 전원 공급은 Fig. 4.10과 같이 25.9V, 5.3Ah와 25.9V, 10.6Ah 2개의 배터리를 이용하였다. 무게 중심조절 액추에이터와 수중 추진체의 모터 구동 전압은 24V이다. 수중 추진체를 구동하기 위해서는 200W급의 DC/DC를 사용하여야 하는데 100W의 DC/DC보다 2배이상 커지기 때문에 사용할 수 없고 대신에 모터드라이브 내부에 전압을 안정시키는 회로가 있어 배터리의 전원을 바로 사용하였다. 그리고 100W급 24-24 DC/DC 1개를 연결하여 무게 중심조절 액추에이터 모터에 전원을 공급하였고, 가변 추진체의 RX-28모터의 경우 권장 구동 전압이 15V이다. 이를 위해 100W급 24-15 DC/DC를 통해 가변 추진체에 전원을 공급하였다.

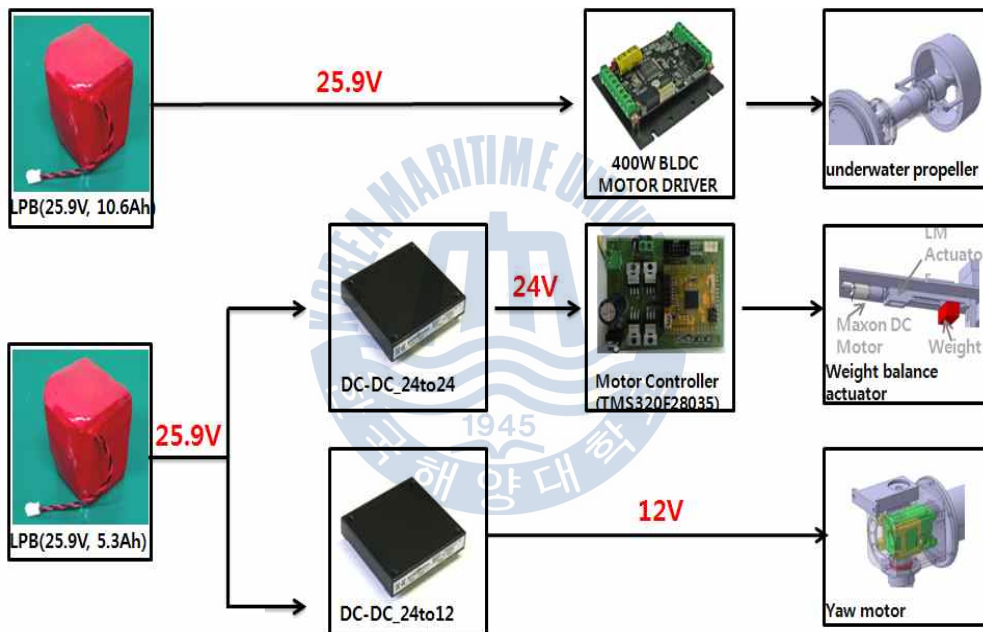


Fig. 4.10 Motor part power system

4.3 위치 제어 알고리즘

본 연구에서 개발한 모터 드라이버의 제어부는 TI사의 DSP TMS320F28035 Piccolo 계열의 32bit Fixed-Point 프로세서이다. 이 프로세서는 제어 성능을 높이기 위한 CLA(Control Law Accelerator)가 탑재되어 있어 독립적으로 알고리즘을 수행하고, PWM과 ADC를 CPU의 도움없이 제어 할 수 있기 때문에 상대적으로 CPU는 다른 알고리즘 수행이나 주변회로 제어를 할 수 있어 전체적이 시스템 성능 향상시킨다. 또한 12비트 ADC(Analog Digital Converter)와 다양한 통신 CAN, SCI, SPI를 지원한다.

모터 제어를 위해 DSP TMS320F28035의 주변 회로를 Fig. 4.11와 같이 구성하였고 Fig. 4.12과 같이 모터 제어 시스템을 구성하였다.

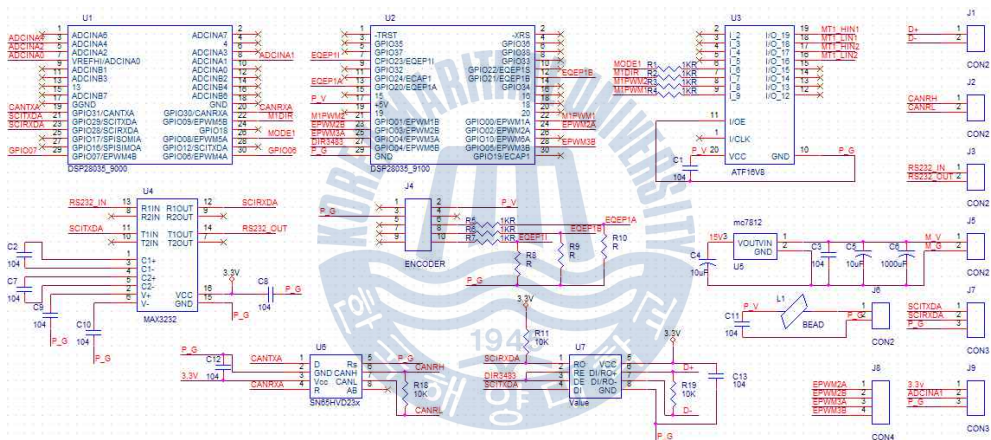


Fig. 4.11 The circuit of motor controller

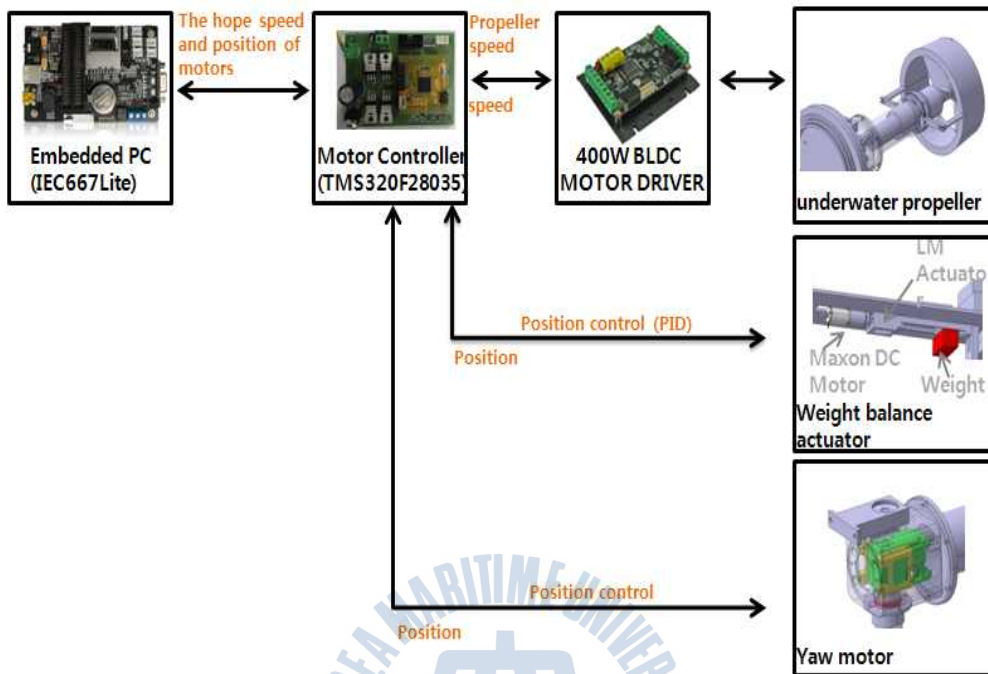


Fig. 4.12 Motor control system

본 논문에서는 Fig. 4.13과 같이 보편적인 사다리꼴 속도 프로파일의 경로 궤적 방식을 사용하여 이에 상응하는 속도 및 위치 제어를 함으로써 각 관절을 제어하였다. 또한 초기 속도값이 존재하는 방식으로 경로 추종 중에도 새로운 경로 궤적으로 변경이 가능한 방식이다. 속도 및 위치 제어 알고리즘으로는 일반적으로 많이 사용하는 PID 제어 알고리즘을 사용하였다. 모터 모션 컨트롤러에 Fig. 4.13과 같은 경로 궤적 방식을 적용하기 위해서는 위치 경로 궤적 함수가 필요하다. 본 연구에서 궤적 추적 루프 타임을 1000Hz, 즉 1ms로 하여 이동 경로 궤적을 추종하도록 하였다.

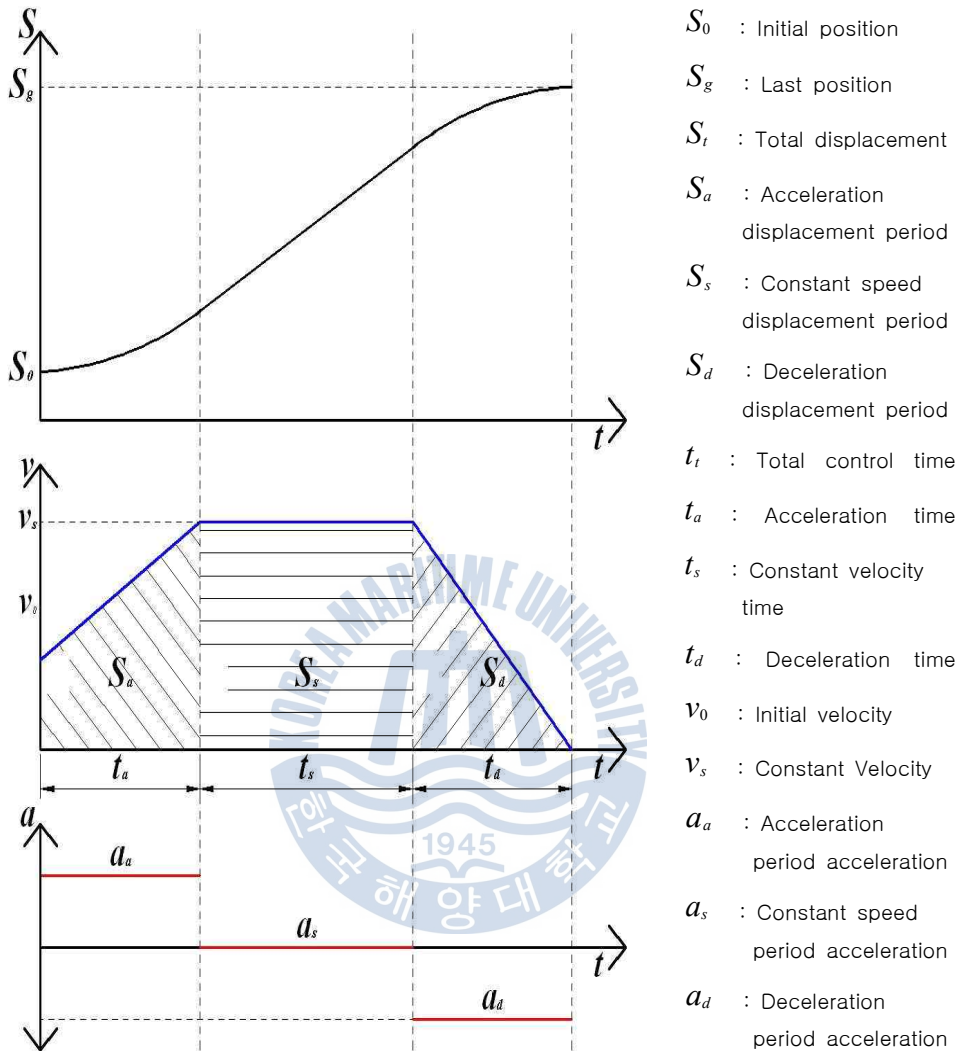


Fig. 4.13 Trapezoidal velocity profile

최종 목표 위치 S_g 와 총 제어 시간 t_t 은 기본적으로 주어지는 위치 변경 명령에서 주어지는 값들이다. 또 초기 시작 위치 S_0 와 속도 v_0 는 현재 상태의 초기값들이다. 여기서 가감속 기간을 일정 비율적으로 정의하는 방법과 일정한 가감속도 정의하는 두가지 방법으로 위치 이동 궤적 함수를 생성할 수 있다. 본 연구에서는 가감속 시간을 일정 비율적으로 정의하는 방법으로 이동 궤적 함수를 정의하여 모션 컨트롤러에 적용하였다.

따라서 가속 시간 t_a , 등속 시간 t_s , 감속 시간 t_d 는 총 제어 시간에 따라 비율적으로 정의된 값으로 나머지 변수들에 대해 구해 보면 다음과 같다.

$$S_a = \frac{v_s + v_0}{2} \cdot t_a, \quad S_a = v_s \cdot t_a, \quad S_a = \frac{v_s \cdot t_d}{2} \quad (4.1)$$

$$S_t = S_g - S_0 = S_a + S_s + S_d = \frac{v_s(t_a + 2t_s + t_d) + v_0 \cdot t_d}{2} \quad (4.2)$$

식(4.1)과 식(4.2)로부터 다음과 같이 등속도가 정의된다.

$$v_s = \frac{2S_t - v_0 \cdot t_d}{t_a + 2t_s + t_d} \quad (4.3)$$

식(4.3)으로 구한 등속도로 각 기간별 가속도를 구하면 다음과 같다.

$$a_a = \frac{v_s - v_0}{t_a}, \quad a_d = \frac{v_s}{t_d} \quad (4.4)$$

식(4.1)에서 식(4.4)의 식들을 통하여 이동 궤적 함수를 구하기 위한 필요한 변수는 모두 구하였다. 이를 바탕으로 각 기간 별 속도함수와 위치함수는 다음과 같다.

가속 기간 : $0 < t < t_a$

$$v(t) = v_0 + a_a \cdot t \quad (4.5)$$

$$S(t) = S_0 + \frac{v_0 + v(t)}{2} \cdot t = S_0 + \frac{2v_0 + a_a t}{2} \cdot t \quad (4.6)$$

등속 기간 : $t_a < t < (t_a + t_s)$

$$v(t) = v_s \quad (4.7)$$

$$S(t) = S_0 + S_a + v_s(t - t_a) \quad (4.8)$$

감속 기간 : $(t_a + t_s) < t < (t_a + t_s + t_d)$

$$v(t) = v_s - a_d(t - t_a - t_s) \quad (4.9)$$

$$S(t) = S_0 + S_a + S_s + \frac{v_s + v(t)}{2} \cdot t = S_0 + S_a + S_s + \frac{2v_s - a_d(t - t_a - t_s)}{2} \cdot t$$

또는
$$S(t) = S_g - \frac{a_d(t_t - t)^2}{2} \quad (4.10)$$

여기서 가속도가 상수이고 속도 함수가 모두 1차식 이하로 이전 속도 v_p 와 현재 속도 v_p 로 하여 다음과 같이 간단하게 정의 할 수 있다.

가속 기간 : $0 < t < t_a$

$$v_p = v_b + a_a \quad (4.11)$$

등속 기간 : $t_a < t < (t_a + t_s)$

$$v_p = v_s \quad (4.12)$$

감속 기간 : $(t_a + t_s) < t < (t_a + t_s + t_d)$

$$v_p = v_b - a_d \quad (4.13)$$

이전 위치 S_b 와 현재 위치 S_p 에 대해서는 가감속 및 등속 기간 관계없이 다음 식으로 간단하게 정의된다.

$$S_p = S_b + \frac{v_b + v_p}{2} \quad (4.14)$$

모션 컨트롤러에 식(4.11)~(4.14)를 모터 모션 경로 궤적 알고리즘으로 적용하였다.



4.4KAUV-1 GUI 개발

KAUV의 구동을 위해 개발한 GUI 프로그램은 Fig. 4.14와 같다. Microsoft Visual C# 프로그램을 이용하여 개발하였다. KAUV의 실험을 위해 다양한 편의성 기능을 추가하였으며 send data의 명령 입력을 통하여 간단한 제어가 가능하고 W & A flag를 통하여 위치 추정, 각도추정, 수심제어가 가능하고 monitoring 화면을 통하여 실시간으로 AUV의 위치정보 및 센서정보를 볼 수 있으며 Send 버튼을 통한 데이터 저장이 가능하게 구성하였다.

임무를 전달 받은 KAUV는 아래 Fig. 4.15와 같이 항법 보드로부터 KAUV의 위치정보를 입력 받아 임베디드 컴퓨터에서 KAUV 제어 알고리즘을 통하여 모터 컨트롤러에 모터 제어 명령을 전달하고 모터 컨트롤러가 각 모터를 제어 함으로써 KAUV는 구동 되어진다.

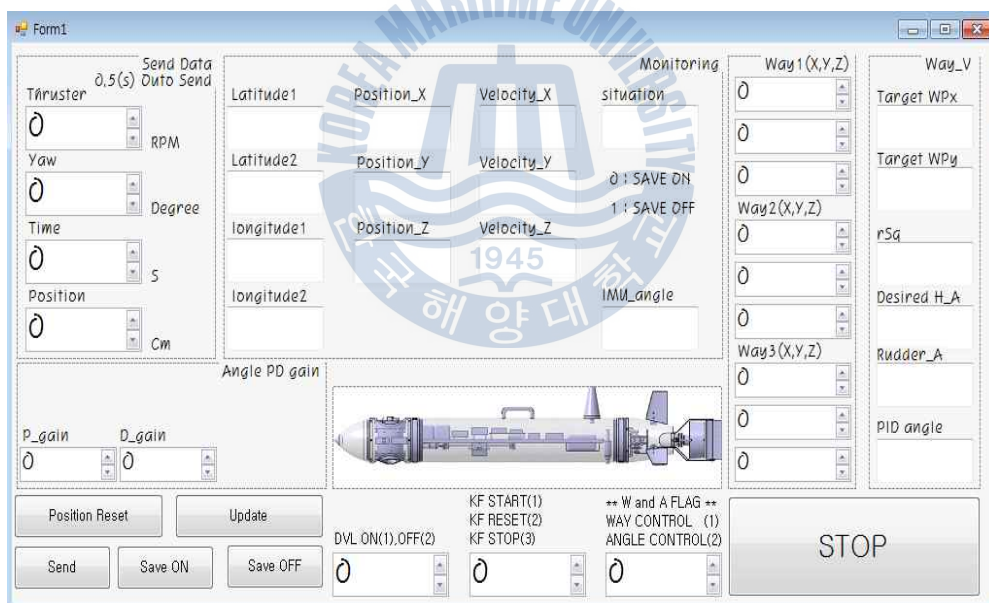


Fig. 4.14 GUI program of KAUV

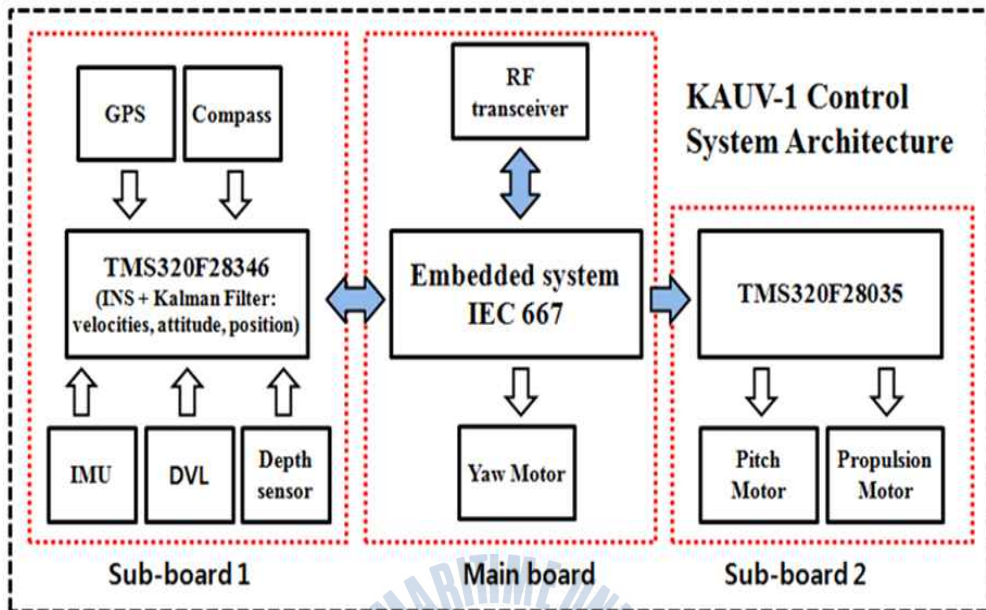
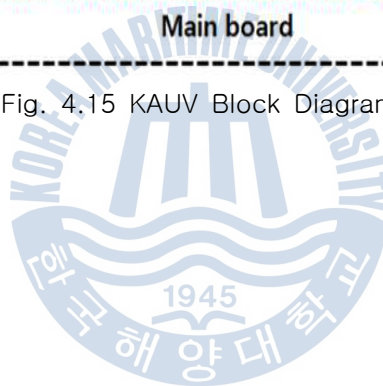


Fig. 4.15 KAUV Block Diagram



5 AUV 통합항법 개발

5.1 좌표계

무인잠수정의 초기의 자세를 구하기 위한 초기계략정렬과 수중복합항법시스템에서의 무인잠수정의 자세와 위치, 속도를 구하기 위해서는 좌표계와 서로 다른 좌표계간의 좌표변환을 정의해야 한다.

항법 좌표계(Navigation coordinate)는 운동체의 질량 중심을 원점으로 하고 세 축이 북, 동, 수직 아래쪽을 향하는 지역 수평(Local level) 좌표계로 D-축은 지구 타원체에 직교(Orthogonal)하고, E-축은 정동, N-축은 정북을 가리키는 좌표계로 Fig. 5.1과 같이 정의한다.

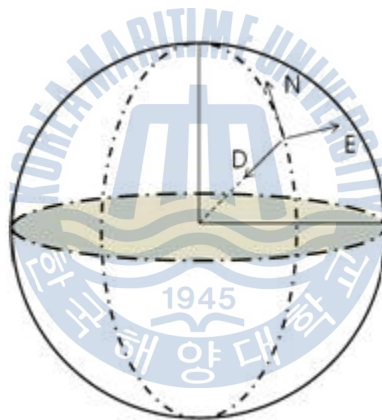


Fig. 5.1 Navigation coordinate

동체 좌표계(Body coordinate)는 무인잠수정의 질량 중심을 기준으로 하는 좌표계로 Fig. 5.1의 무인잠수정을 기준으로 하여 무인잠수정의 x-축을 롤(Roll, ϕ), y-축을 피치(Pitch, θ), z-축을 요(Yaw, ψ)로 정의한다.

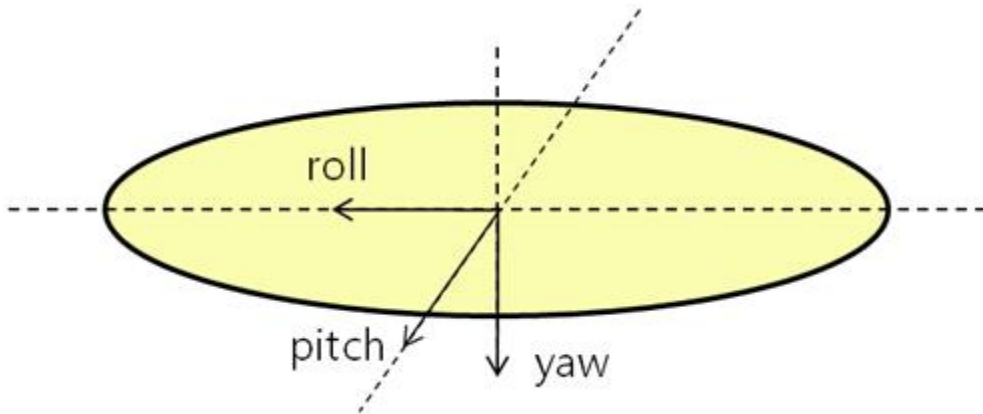


Fig. 5.2 Body coordinate

센서가 출력하는 값이 기준이 되는 좌표계(동체 좌표계)와 항법시스템에서 기준으로 사용되는 좌표계(항법 좌표계)는 서로 다르다. 그러므로 무인잠수정의 자세 값을 계산하기 위해서는 좌표계 간의 좌표변환이 필요하다. 좌표계 간의 좌표변환행렬로서 공학과 과학적인 응용에 많이 사용되는 것이 DCM(Direction Cosine Matrix)이다. DCM은 서로 다른 Cartesian 좌표계간의 좌표변환을 쉽게 할 수 있다.

항법 좌표계로 정의된 벡터와 동체 좌표계로 정의된 벡터라면, 이들간의 관계는 식(5.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}^b = C_n^b \mathbf{r}^n \quad (5.1)$$

자세 변환 행렬 는 DCM이라고 하며, 세계의 좌표축 roll, pitch, yaw에 대한 연속적인 회전을 통해 얻은 행렬들을 곱하여 구할 수 있으며, x축의 roll, y축의 pitch, z 축의 yaw를 회전행렬을 순서대로 곱하면 항법 좌표계에서 동체 좌표계로 변환하는 로 식(5.2)와 같다.

$$C_n^b = C_3^b(\phi)C_2^3(\theta)C_n^2(\psi) = \begin{pmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & c_\theta s_\phi \\ c_\phi c_\psi s_\theta + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - c_\psi s_\phi & c_\phi c_\theta \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

여기서, 기본 동차 변환 행렬은 다음과 같다.

$$C_3^b(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}, C_2^2(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}, C_n^2(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

초기 자기정렬(initial self-alignment)이란 항법 모드 진입 전에 항체가 정지한 상태에서 가속도계와 자이로 센서의 측정치로부터 항법좌표계에 대한 동체좌표계의 초기자세를 구하는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서 사용된 3축 각속도 센서의 경우 저가형으로 구성되어 있어 지구 자전각속도를 구할 수가 없기에 지자기 센서와 가속도 센서를 이용한 초기 계략 정렬을 수행한다. 본 논문에서는 개략 정렬 시 중력가속도 정보를 포함하는 가속도계 출력을 이용하여 Roll, Pitch 을 계산한 후, 계산된 Roll, Pitch 그리고 지구의 지자기 벡터 값을 포함하는 3축 지자기센서를 이용하여 Yaw를 구하게 된다. roll과 pitch를 구하기 위해서는 무인잠수정이 움직이지 않을 때, 중력가속도에 항법 좌표계에서 동체 좌표계로 변환하는 DCM을 곱하면 센서의 가속도 출력 값과 같다는 가정이 필요하며, 식(5.4)와 같이 표시할 수 있다.[10]

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -g s_\theta \\ g c_\theta s_\phi \\ g c_\theta c_\phi \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

a_x, a_y, a_z 는 관성센서의 가속도 출력 값으로 동체 좌표계에서의 벡터 값이고 g 는 중력가속도를 나타낸다. roll(ϕ)과 pitch(θ)을 식(5.5)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{a_y}{a_z} = \frac{g c_\theta s_\phi}{g c_\theta c_\phi} = \frac{s_\phi}{c_\phi} = \tan(\phi)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (5.5)$$

식(5.4)에서 보는 바와 같이 중력가속도 g 에 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 변환 행렬을 곱하면 yaw축 값이 사라짐을 알 수 있다. 따라서, 가속도 이외의 다른 센서의 이용이 필요하다. 일반적으로 자이로 센서로 지구의 자전속도를 검출하는 방법을 사용하지만, 본 논문에서 사용하는 센서의 경우 저가형으로 지구의 자전속도를 검출하지 못한다. 따라서, 지자기 센서를 이용하여 yaw축을 구하는 작업을 진행하였다.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

항법 좌표계의 지구의 지자기 벡터 x 축을 m_1 , y 축을 m_2 , z 축을 m_3 로하고 동체 좌표계의 지자기 센서 출력 x 축을 m_x , y 축을 m_y , z 축을 m_z 로 정의하면 항법 좌표계의 지자기 벡터에 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 변환 행렬을 곱하면 식(5.6)과 같이 가정 할 수 있다.

yaw값을 구하기 위한 계산 상의 편의를 위해, C_n^b 를 yaw에 관한 행렬, roll, pitch에 관한 행렬로 나누면 식(5.7)과 같다.

$$C_1 = \begin{pmatrix} c_\theta & 0 & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta & c_\phi & s_\phi c_\theta \\ c_\phi s_\theta & -s_\phi & c_\phi c_\theta \end{pmatrix}, C_2 = \begin{pmatrix} c_\psi & s_\psi & 0 \\ -s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

$C_n^b = C_1 C_2$ 이므로, 식(5.8)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_1 C_2 \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

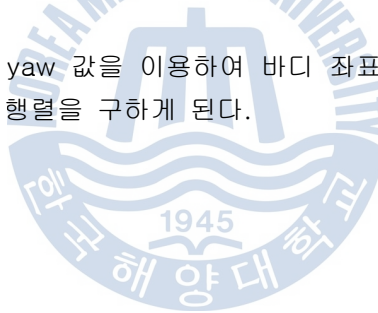
따라서 다음의 결과를 구할 수 있다.

$$t_3 = \frac{s_\psi}{c_\psi} = \frac{-m_2X + m_1Y}{-m_1X - m_2Y} = \tan(\psi) \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{-m_2X + m_1Y}{-m_1X - m_2Y}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{-m_2(c_\theta m_x + s_\theta s_\phi m_y + c_\phi s_\theta m_z) + m_1(c_\phi m_y - s_\phi m_z)}{-m_1(c_\theta m_x + s_\theta s_\phi m_y + c_\phi s_\theta m_z) - m_2(c_\phi m_y - s_\phi m_z)}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{-m_2c_\theta m_x - m_2s_\theta s_\phi m_y - m_2c_\phi s_\theta m_z + m_1c_\phi m_y - m_1s_\phi m_z}{-m_1c_\theta m_x - m_1s_\theta s_\phi m_y - m_1c_\phi s_\theta m_z - m_2c_\phi m_y + m_2s_\phi m_z}\right) \end{aligned} \quad (5.10)$$

roll, pitch 초기 정렬을 실행을 하면 식(5.10)의 우변의 항은 상수 값이 되므로 yaw의 값을 구할 수 있게 된다.

앞에서 구한 roll, pitch, yaw 값을 이용하여 바디 좌표계를 실제 공간 좌표계인 지구 좌표계로 변경하는 행렬을 구하게 된다.



5.2 항법시스템 제작

5.2.1 항법 및 센서 성능

(1) GPS

GPS란 Global Positioning System의 약자이며, 미국에서 현재위치 및 자동차, 선박, 항공기 등의 항법 장치 사용을 목적으로 쏘아 올린 인공위성을 이용하여, 현재 위치를 계산할 수 있는 시스템 이다. 대역에 따라 L1, L2로 나누어지며, 일반적으로 사용 가능한 대역은 L1 대역이며 위치 오차가 10~20미터 정도 된다. L2 대역은 군사 및 정밀 측위용 대역으로서 일반사용자는 L2역의 위성 수신을 하지 못한다.

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

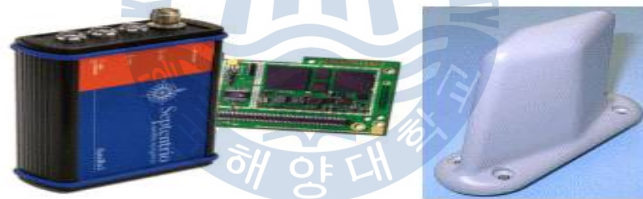


Fig. 5.3 GPS, Antenna

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

Table. 5.1 GPS specification

GPS	Output	latitude	
		longitude	
		altitude	
		time	
	Specification	Static accuracy(latitude)	< 0.7m
		Static accuracy(longitude)	< 0.7m
		Static accuracy(altitude)	< 1.2m
	Interfacing	Digital interface	RS-232
		Operating voltage	5V $\pm$ 5%
		Power consumption	<1W

(2) 도플러 속도계(DVL)

해저 바닥면에서 반사되어 음파의 도플러 현상을 이용하여 수중에서 무인잠수정의 3차원 속도를 계측하는 시스템이다.

도플러 센서의 세부 사양은 아래 도표에 나타낸다. 도플러 센서는 바닥면의 반사파를 계측하므로 트랜스듀서는 아래를 향하고 있어야 하며 무인 잠수정이 바닥면에 앉아 있는 경우에도 계측이 가능하도록 최소 측정 거리인 50cm이상의 높이에 설치되어야 한다. 트랜스듀서의 방향은 beam1 과 beam3 사이의 위치가 전방을 향해야 한다



Fig. 5.4. DVL

Table. 5.2 DVL specification

DVL	Output	x-axis velocity	
		y-axis velocity	
		z-axis velocity	
	Specification	accuracy	$<1\% \pm 1\text{mm/s}$
		Maximum Velocity	$\pm 20 \text{ knots}$
	Interfacing	Digital interface	RS-232, RS-422
		Operating voltage	$24\text{V} \pm 2\%$
		Power consumption	$2\text{W} \sim 5\text{W}$

(3) IMU

IMU는 MEMS 센서 기반의 소형/경량 관성 측정 장치로써 3축 각속도, 3축 가속도와 3축 지자기 센서를 기반으로 자동차, 항공기와 같은 이동하는 물체의 위치, 자세, 속도 등의 정보를 제공하는데 사용될 뿐만 아니라 로봇, 기계장치 및 사람의 움직임을 측정하는데 사용할 수 있는 센서이다.

무인항공기(UAV), 무인차량(UGV), 무인잠수정(UUV), 수중어뢰, 유도무기체계 등에 적용할 수 있으며 자세추정, 자율제어 및 유도, 항법 응용분야에 사용된다.



Fig. 5.5 IMU

Table. 5.3 IMU specification

IMU	Output	3D orientation	
		3D acceleration	
		3D rate of turn	
		3D magnetic filed	
	Specification	roll	<0.5°
		pitch	<0.5°
		yaw	<1 °
	Interfacing	Digital interface	RS-232, RS-485, RS-422
		Operating voltage	4.5V ~ 30V
		Power consumption	350 mW

(4) Depth sensor

응력을 받으면 저항값이 변화하는 반도체 피에조 저항효과를 이용하여, 압력이 다이어프램을 변형시키면 감압소자위에 붙어 있는 가스 확산방식의 피에조 저항의 값이 변화한다.

이 원리를 이용하여 휘스톤브리지 회로로 구성된 4개의 피에조저항은 정전류로 구동하며, 압력을 받으면 출력단에 압력에 비례한 정압신호를 얻을 수 있고, 온도보상회로를 함께 내장하여 정도를 일정 하게 유지시킨다.



Fig. 5.6 Depth Sensor

Table. 5.4 Depth sensor specification

Depth	Output	0~5V	
	Specification	accuracy	±0.15%
	Interfacing	Operating voltage	11V~28V
		Power consumption	0.5W

5.2.2 The Extended Kalman Filter (EKF)

Fig. 5.7은 본 논문에 적용된 Kalma filter의 알고리즘을 나타낸다 [11][12][13][14][15][16][17][18]. Kalma filter는 선형 시스템을 대상으로 개발된 알고리즘으로 비선형 시스템에는 적합하지 않다. AUV는 비선형 시스템이기 때문에 본 연구에서는 비선형 시스템에 적용 가능한 확장칼만 필터를 적용하였다.

확장 칼만 필터는 미리 지정한 선형화 기준점을 사용하지 않고 직전 추정값 $\hat{x}_k$ 을 기준으로 잡는다. 시스템의 실제 상태와 가장 가까운 값은 직전 추정값이라고 보고, 이 값을 기준으로 선형 모델을 계산한다.

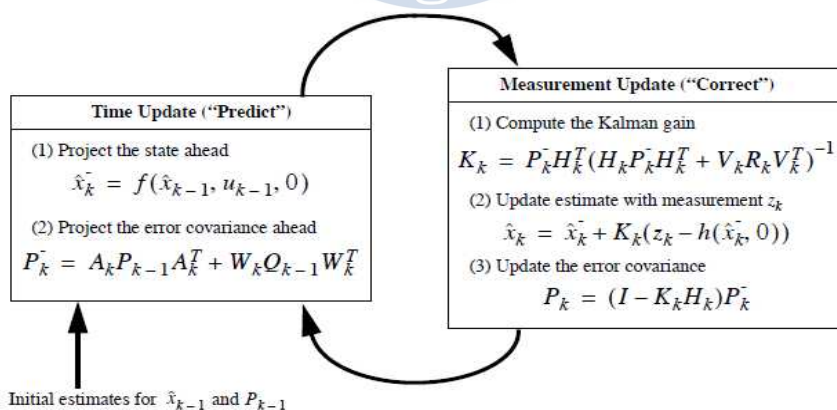


Fig. 5.7 The operation of the extended Kalman filter

5.2.3 DVL 성능실험

(1) DVL성능 시험 장치 구성

DVL 센서의 성능 시험을 위해 가로 7m 세로 5m인 실내 수조에 Fig. 4.8와 같은 시험 장비를 제작하였다. 시험 장비는 정확한 기준 속도와 위치를 알 수 있도록 모터와 엔코더 및 타이밍 벨트를 이용한 트랙 시스템으로 구성 하였다. 모터는 120W급 Maxon motor를 이용하였고 모터 컨트롤러는 DSP2812를 이용하여 속도 제어를 하였다.

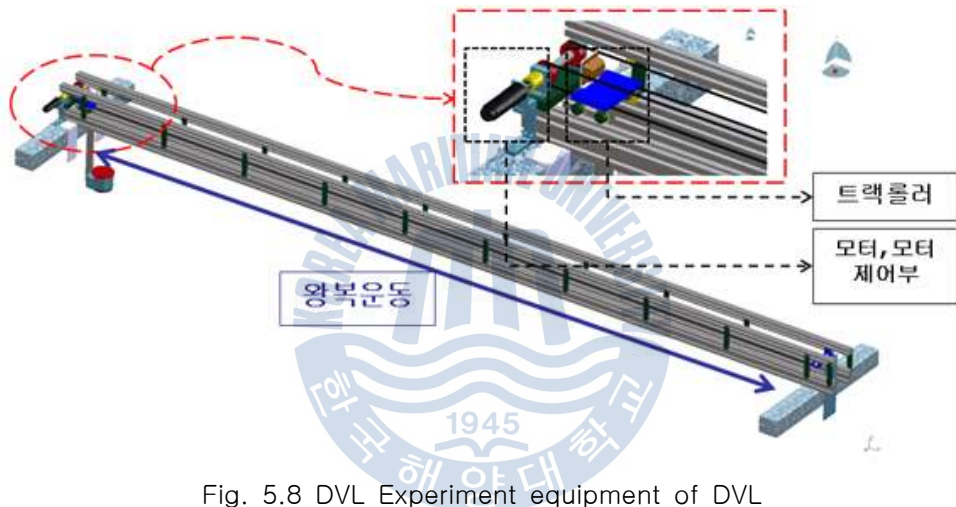


Fig. 5.8 DVL Experiment equipment of DVL



Fig. 5.9 DVL test bed

DVL 테스트 장비는 Fig. 5.9 과 같고, DVL의 설치는 Fig. 5.10과 같이 DVL의 Beem 부분이 물에 잠기는 구조로 장착 하여 실험 하였다.

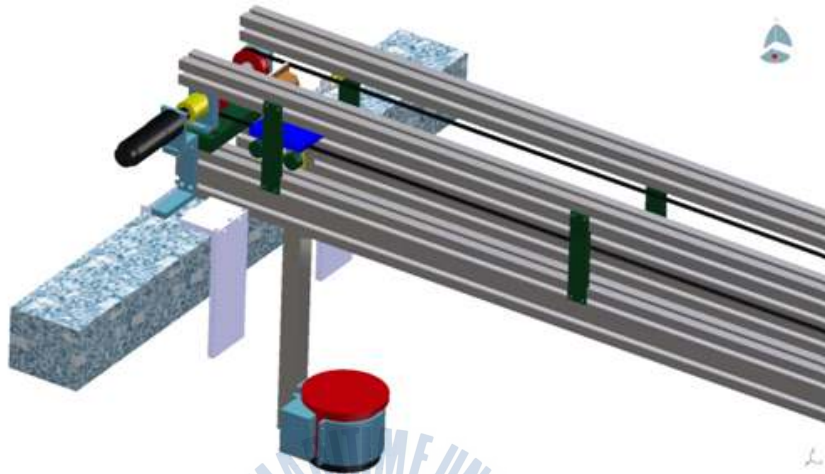


Fig. 5.10 The fixed part for DVL

(2) DVL 성능 실험

Fig. 5.8과 같이 구성된 DVL 실험장치를 이용하여 DVL의 기본적인 성능 시험을 실시하였다. 수조의 가로 길이 방향의 거리는 5m인데 실제로 장비를 설치하고 테스트를 할 수 있는거리는 최소 요구 거리 상 0.5m의 오프셋을 주고 테스트를 하여 4m 왕복운동 테스트를 실시하였다. 속도는 0.3m/s로 테스트를 하였다. 시험 결과는 아래 그래프와 같다.

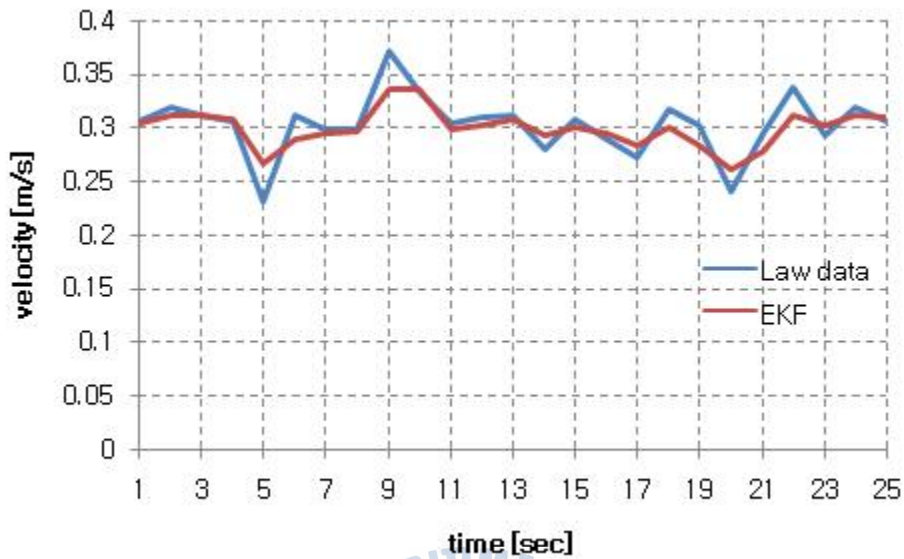


Fig. 5.11 DVL law data comparing with an adapted EKF data at velocity 0.3m/s

Fig. 5.11은 실제 수조 시험의 결과이다. 시험 장비의 속도를 0.3m/s로 시험을 하였다. 필터를 사용 하지 않았을 때의 평균속도는 0.3031m/s였고, 필터를 적용 하였을 때의 평균속도는 0.2999m/s였다. 시험 결과는 실제 속도 값과 유사하게 DVL의 센서 출력 값이 나오는 것을 확인 할 수 있었고 필터를 적용하여 노이즈를 제거하여 실제 값에 유사하게 나오는 것을 확인하였다.

5.2.4항법장치 구성

DSP28335(Fig. 5.13)에서는 전체 센서의 출력과 입력 시간을 받아 AUV의 위치 좌표를 연산해 낸다. AUV의 센서의 경우 GPS를 제외한 다른 센서는 body를 기준으로 센서의 출력이 나오기 때문에 좌표 변환과 Extended Kalman filter를 이용하여 센서에서 나오는 노이즈를 제거 하였다.

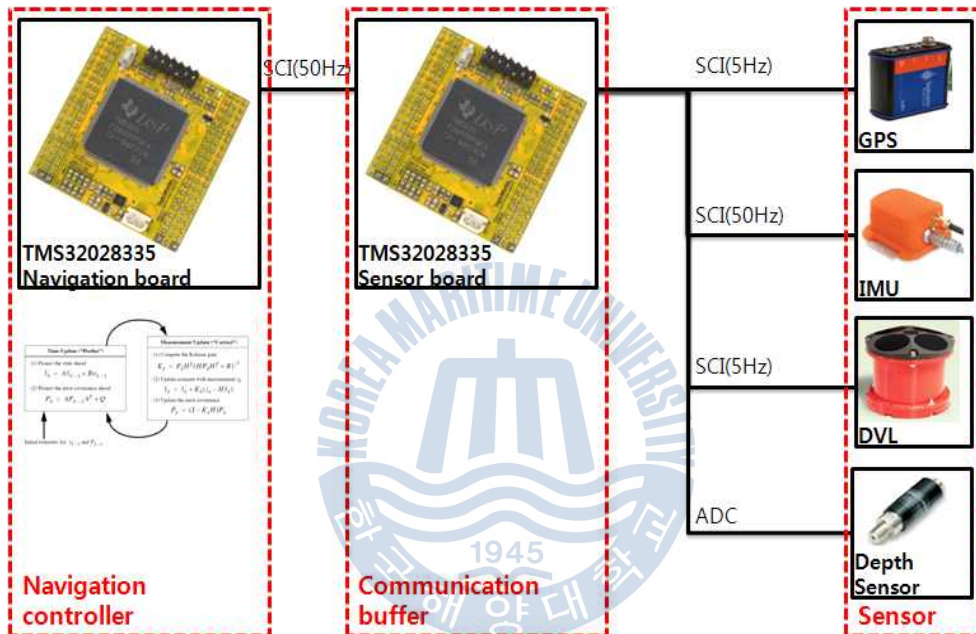


Fig. 5.12 Configuration of navigation board

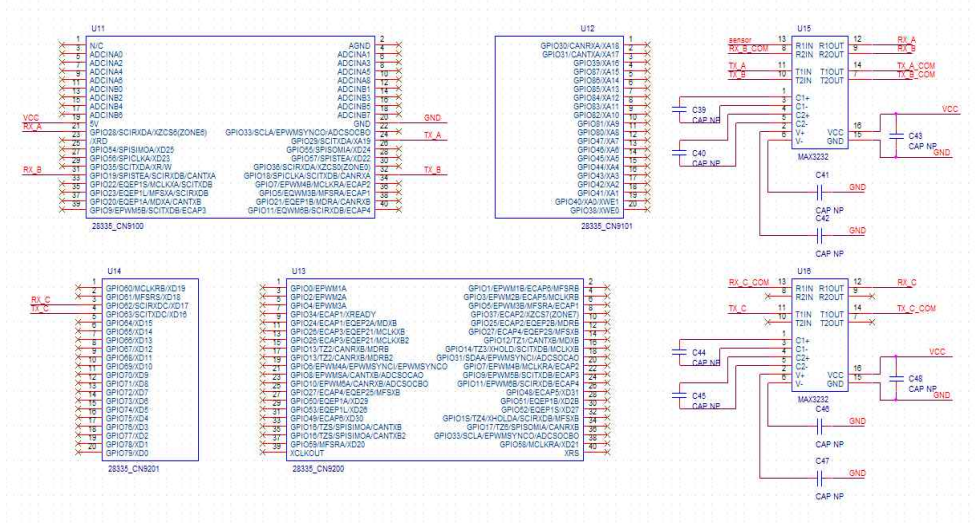


Fig. 5.13 Navigation Controller(DSP 28335)

AUV의 항법 시스템은 소형으로 구성하기 위해서 기판을 제작하였고 항법 보드는 두 개의 DSP320F28335로 구성되어 있으며 하나의 DSP320F28335 보드는 센서보드로 사용되어 IMU, DVL, GPS, Depth sensor의 데이터를 받아들인다. 센서 각각의 정보의 업데이트 및 시간 출력이 다르기 때문에 연산 속도가 빠른 고성능 MCU를 사용하였으며 이렇게 각각의 센서 데이터를 받아서 하나의 통신 패킷으로 만든 다음 네비게이션 보드에 50Hz 주기로 센서의 데이터를 보내주게 되며 그렇게 받은 센서 데이터를 Kalman filter를 이용하여 위치 값을 추정해내는 네비게이션 컨트롤러를 구성 하였다.

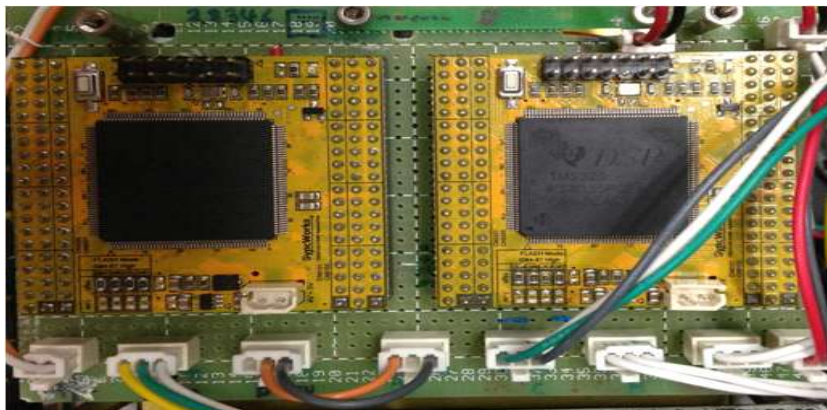


Fig. 5.14 Navigation board

5.3 항법시스템의 성능시험

5.3.1 수상항법시스템

항법 시스템은 수중에서 KAUV가 원하는 경로를 추적하도록 하는 일련의 장치를 의미하며 이러한 센서에서 나오는 출력신호를 보다 정밀한 신호 데이터로 바꾸는 Extended Kalman filter 알고리즘을 포함한다. 항법 센서들을 이용하여 현재의 위치를 항상 확인하고 이를 바탕으로 다음 침로를 결정하는 일련의 연속적인 작업으로 이루어진다. 일반적으로 그 위치는 3차원적으로 표시되나 단순 실험에서는 고도의 차원을 별개로 취급하고, 위치 · 속도 · 침로 등을 지표면에 투사하여 2차원적인 표시(위도와 경도, 또는 방위와 수평거리)에 의해 표시하기로 한다.

본 연구에서 AUV 항법시스템에서 항법센서는 GPS, DVL, IMU, Depth sensor를 이용한 센서 융합을 통하여 KAUV 위치 및 자세를 찾아내고 센서 항법의 차원으로 구분하며 수상항법과 수중항법으로 구분된다. 본 연구에서 구성한 항법 시스템은 다음과 같다.

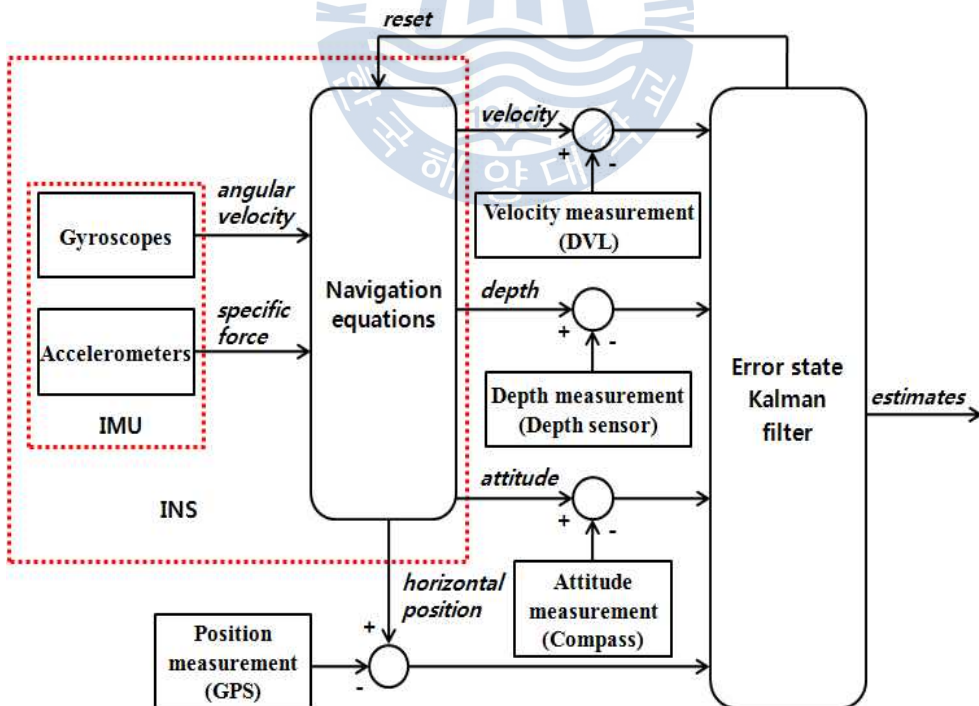


Fig. 5.15 Navigation system

수상에서의 AUV 구동시 H/W 구성은 Fig. 5.15에서 보는 바와 같이 GPS, DVL과 IMU를 이용하여 위치 및 자세를 구한다. 수상에서는 GPS 신호를 받을수 있어서 근본적으로 이 신호를 근간으로 AUV 의 위치 및 속도를 제어한다. 하지만 GPS의 위치오차범위가 0.7m로 상대적으로 크고 센서 수신 샘플링 시간이 0.5s로 늦거나 때로는 수신이 끊어지는 경우가 종종있다. 이러한 갭을 보완하기 위해서 DVL 센서를 융합하여 사용하였다. IDVL 센서의 경우 센서의 노이즈로 인하여 적분과정을 통하여 위치를 구하는 과정에서 위치 오차가 증가하게 된다. 반면 GPS의 경우 Table. 5.1에서 보는 바와 같이 시간에 관계없이 0.7m의 위치 오차만 가지고 있다. 짧은 시간에서의 위치는 관성센서를 이용하는 것이 정확하지만 시간에 따른 에러의 증가를 가지고 있는 관성센서의 보정을 위해 GPS가 필요하다. 수상에서의 제어는 비교적 정확한 위치를 알 수 있는 GPS, DVL과 자세와 헤딩을 구하기 위한 IMU 센서를 이용하여 항법 시스템을 Fig. 5.16과 같이 구성하였다.

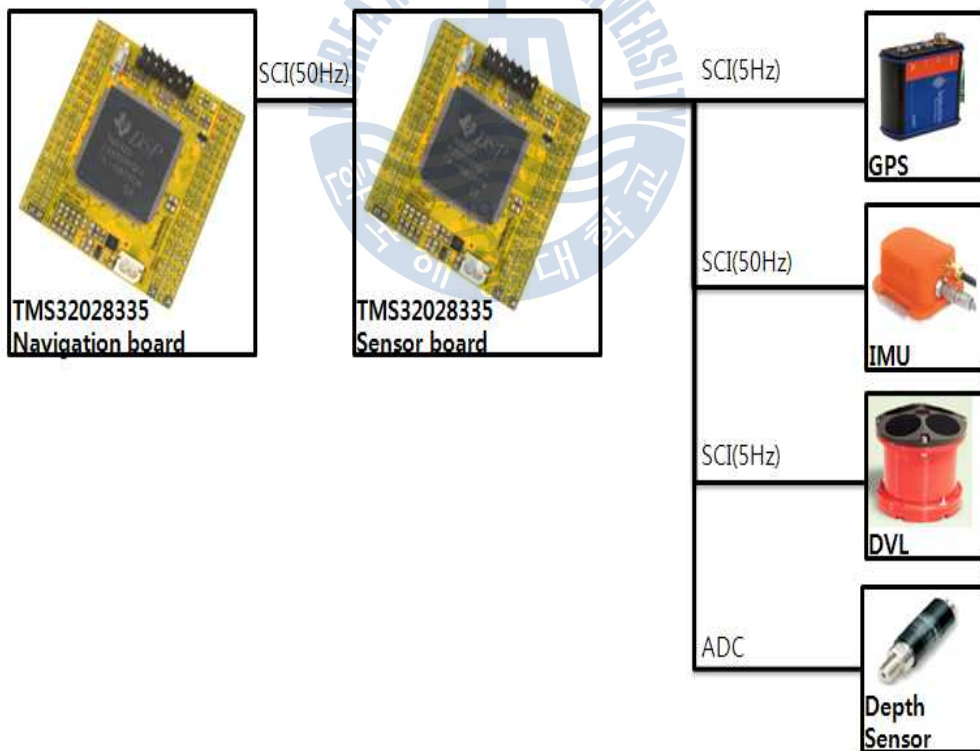


Fig. 5.16 H/W composition of navigation system at surface

Fig. 5.16 에서 GPS 신호와 IMU의 자세정보를 Atmega 128을 버퍼로 이용하여 navigation controller인 DSP 28335에 위치 정보를 SPI 통신을 통해 전송한 뒤 AUV의 위치및 각 정보인 local coordinate과 실제 공간 좌표인 world coordinate 변경 뒤 위치 값을 메인 컴퓨터로 전송한다.

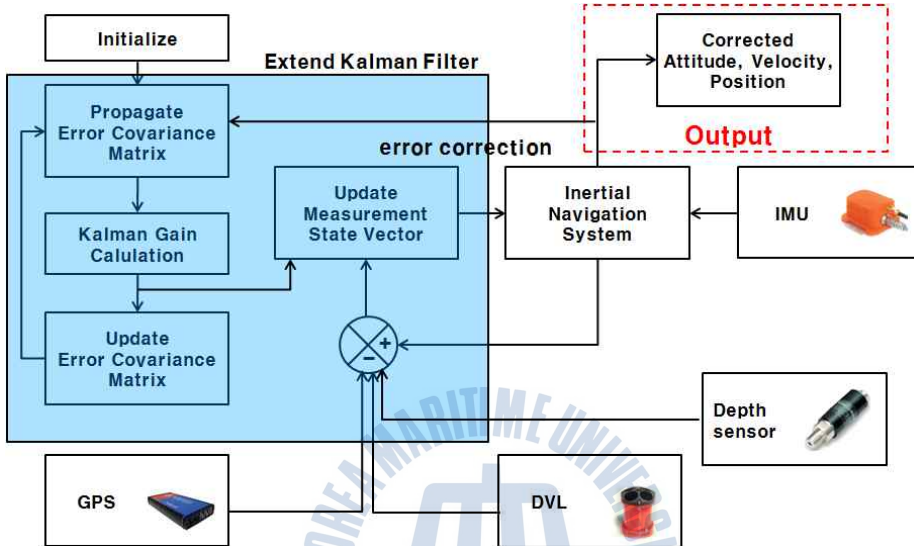


Fig. 5.17 S/W composition of navigation system at surface

5.3.2 수중항법시스템

AUV는 수중이라는 환경에서 운항되기 때문에 AUV의 위치정보와 자세정보를 정확하게 파악 하는 것이 AUV 운항에 있어 가장 중요한 요소이다. AUV는 수중에서 항해하는 관계로 통신이 어려워 GPS와 같은 전파 항법 시스템을 제한적으로 사용 할 수밖에 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 수중 항법 시스템은 초음파 항법인 LBL, USBL, DVL등과 관성센서 IMU, Depth sensor등을 이용하는 항법을 이용하고 있다.

AUV는 IMU, DVL, Depth sensor를 이용한 항법 시스템을 기본으로 AUV가 수면에 부상하였을 때 GPS를 이용하여 위치정보를 보정하는 시스템으로 Fig. 5.18과 같이 구성하였다.

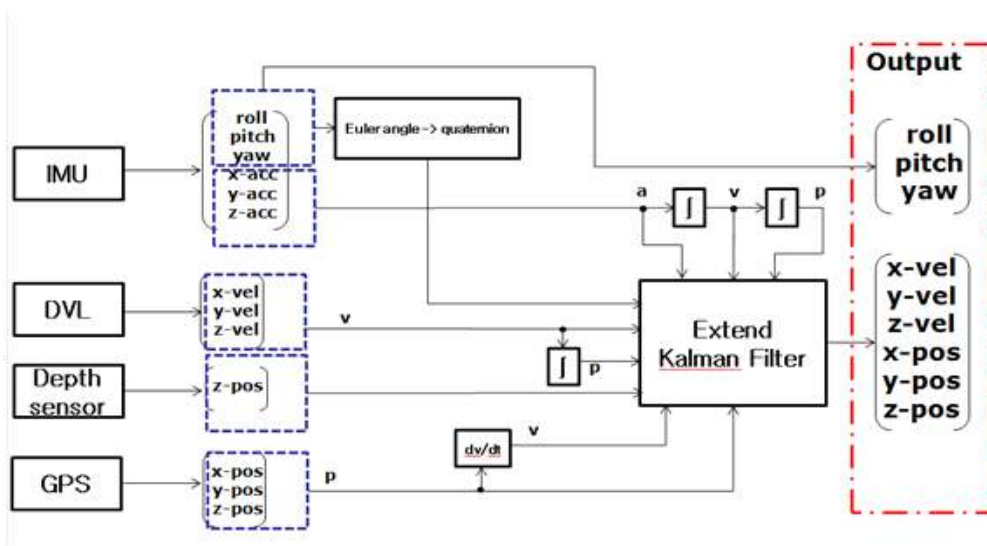


Fig. 5.18 AUV navigation system

수중에서의 항법시스템은 GPS의 신호를 받지 못하게 되어 GPS를 대신 하여 위치 정보를 얻기 위하여 DVL, Depth Sensor, IMU를 이용하여 센서 퓨전을 통하여 AUV의 위치를 추정해 낸다. 수중 항법 시스템의 구성은 Fig. 5.19에 나타나 있다.

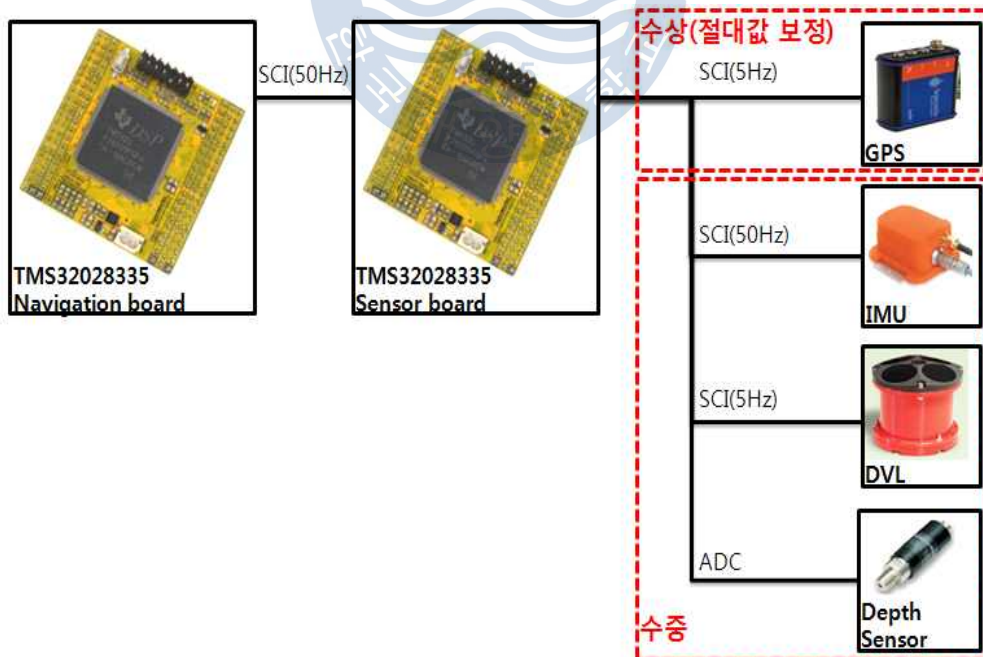


Fig. 5.19 H/W composition of navigation system at underwater

수중에서의 항법 시스템은 DVL에서 나오는 AUV의 속도 정보를 이용하여 위치를 추정해 낸다. DVL 경우 Table. 5.2에서 보는 바와 같이 maximum ping rate가 5/second 이다. 또 측정 노이즈가 더 해져 적분과정을 통하여 위치를 추정하기 때문에 시간이 지남에 따라 위치값이 발산하게 된다. 이를 보정하기 위하여 Kalman Filter를 통하여 측정 신호의 잡음을 제거며 이전의 속도 정보를 통하여 추정을 통해 위치정보를 추정하여 낸다.

Depth Sensor의 경우 비교적 정확한 위치정보를 출력 한다. Row-pass filter를 이용하여 잡음을 제거 후 z축 위치를 알 수 있다.

AUV는 2.5m 사양의 GPS를 사용하기 때문에 근원적으로 큰 위치오차를 갖고 신호의 샘플링시간이 0.5초로 매우 늦으며 때로 신호가 잡히지 않는 경우도 자주 있는 센서를 활용하고 있는 시스템이다. 이를 보완하기 위하여 정확한 각 정보를 내는 AHRS센서를 같이 적용하는 센서융합시스템을 구성하였다. AUV의 GPS,DVL과 AHRS센서를 활용하여 선체의 dynamics을 제어하여 수상에서 원하는 목적지로 항해하며 원하는 위치에서의 동적 위치 제어를 위해서는 항법은 매우 중요하다. 이 항법은 항법장치(hardware)와 항법의 경로를 추정하는 확장 칼만 필터와 같은 추정알고리즘으로 구성된다.

연구에서는 기본적인 동체 고정형 센서인 IMU,DVL센서에 좌표변환 알고리즘을 구성하여 지구고정 좌표 및 회전각 정보를 나타내었다. 이를 위해 확장칼만필터를 사용하였다.

확장칼만필터는 외부 입력인 측정 행렬과 최종 출력인 추정 행렬, 시스템 모델 F 행렬, H 행렬로 구성되며 예측 과정과 추정 과정으로 나뉘어진다.

예측 과정에서는 이전 추정 행렬과 오차 공분산을 입력으로 받아서 현재 상태의 추정 행렬과 오차 공분산을 구하게 된다. 예측 과정에서 사용하는 추정 행렬과 시스템 모델 F 행렬의 구성은 식(5.11)과 식(5.12)와 같다.

식(5.11)의 추정 행렬은 4개의 쿼터니언 원소와 3축 속도 값으로 구성된다.

$$x = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ v_x \ v_y \ v_z]^T \quad (5.11)$$

식(5.12)의 F 행렬은 이전 상태의 추정 행렬을 현 상태의 추정 행렬로 연결 시켜주는 행렬로 구성된다.

$$F = \begin{pmatrix} I_{4 \times 4} & O_{4 \times 3} & O_{4 \times 3} \\ O_{3 \times 4} & I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 4} dt & I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

추정 과정에서는 예측 과정에서의 추정 행렬과 오차 공분산, 측정 행렬을 입력으로 받아 시스템 모델 H 행렬을 이용하여 최종 추정 행렬과 오차 공분산을 구하게 된다. 추정과정에서 사용하는 측정 행렬과 H 행렬 구성은 식(5.13)과 식(5.14)와 같다. 식(5.13)의 측정 행렬은 IMU센서의 자세값과, DVL의 3축 속도 출력 값으로 구성된다.

$$z = (q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ v_x \ v_y \ v_z) \quad (5.13)$$

식(5.14)의 H 행렬은 추정 행렬을 측정 행렬로 연결 시켜주는 행렬로 구성된다.

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_1}{\partial y} & \frac{\partial h_1}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial x} & \frac{\partial h_2}{\partial y} & \frac{\partial h_2}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial x} & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \frac{\partial h_3}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

또한, GPS와 DVL, AHRS센서에서 나오는 신호잡음을 제거하여 보다 정확한 신호를 받고 센서 샘플링 신호 사이의 상태정보를 추정하는 확장칼만필터 알고리즘을 적용하였다.

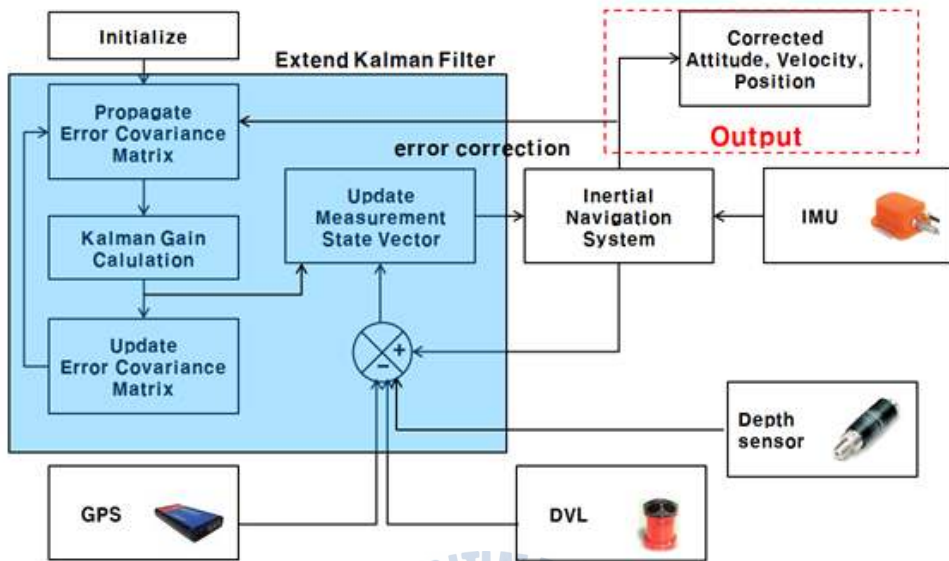


Fig. 5.20 S/W composition of navigation system at underwater

항법 테스트 결과는 KAUV의 기초 운동테스트를 하기 위해 먼저 외란이 없는 실내 수조에서의 운동 성능을 확인하였다. 실내수조 테스트를 위해 DVL과 IMU센서를 이용한 항법장치를 구성하여 위치 정보에 대한 성능도 병행하여 시험 하였고 결과는 Fig. 5.21 와 같고 Fig. 5.21 은 실내 수조에서 방향타 각 30도로 추진기는 3000RPM으로 고정한 상태에서의 DVL과 IMU센서를 이용하여 AUV의 위치를 구한 데이터 이다.

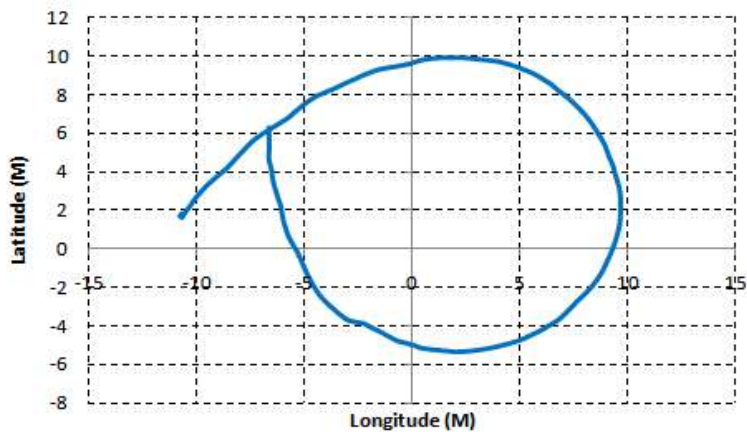


Fig. 5.21 Test result at 3000RPM, rudder angle 30°

5.3.3 수상에서 복합항법 장치 성능 시험

Fig. 5.22는 KAUV를 수상에서 45도의 고정된 angle을 주고 지속적으로 45도로 고정된 angle추정해가는 데이터 이다. 초기 angle을 잡는 데는 시간이 걸리지만 기본적으로 angle을 잡고난 후에는 1도 미만의 오차를 보여주고 있다. Fig. 5.23는 45도로 고정된 angle을 주었을 때 X, Y좌표 값이다.

Fig. 5.24은 원하는 수심2.5m 까지 이동하는데 10s가 걸렸고 그 뒤로 1분가량 2.5m수심을 1분가량 PD control을 이용하여 제어를 유지한 후 다시 수면위로 이동한 것을 볼 수 있다.

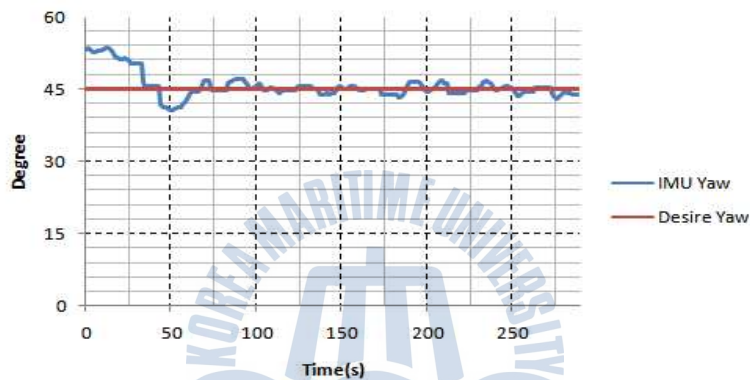


Fig. 5.22 Trajectory at 45 degree

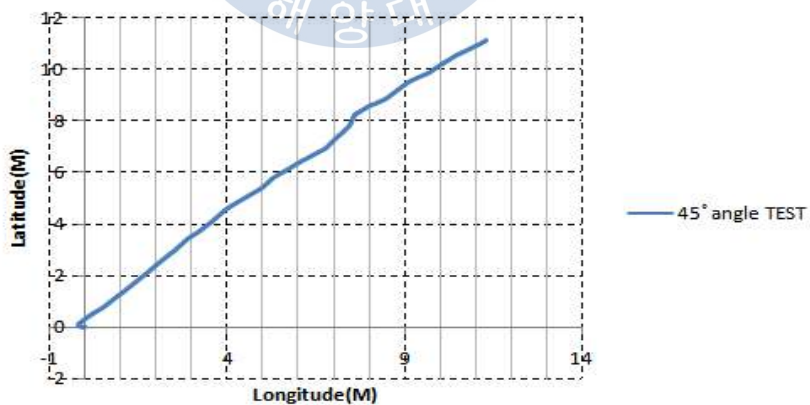


Fig. 5.23 Trajectory of KAUV

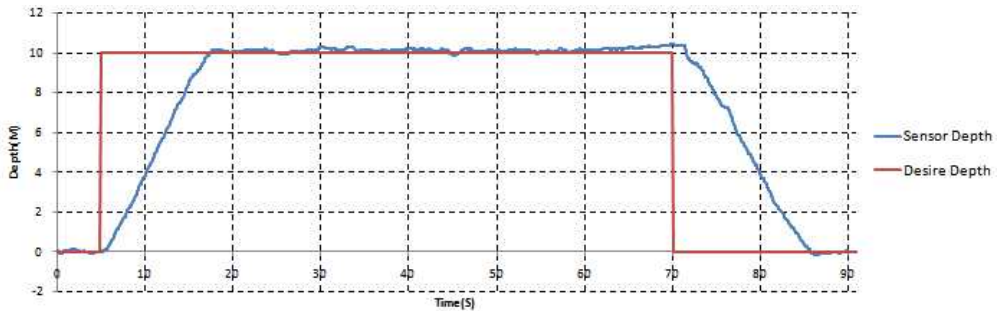


Fig. 5.24 Depth control of KAUV

Fig. 5.25는 KAUV에 (0,0), (14,0), (14,14)의 좌표를 입력 후 KAUV의 동작시뮬 결과를 나타낸 것이다. KAUV가 목표지점 반경 1m내에 도달하면 트레킹이 성공한 것으로 간주하여 지정된 다음 좌표를 찾아가게 된다. 빨간색 데이터(Desire Position)는 디자이너 좌표이고 KAUV가 지정된 좌표에 도착하게 되면 지정한 다음 좌표가 바뀌게 된다. 포지션 데이터가 정확하게 네모가 나오지 않은 이유는 수중이라는 곳에서 테스트를 하였기 때문에 파도등 외부의 외란에 의해 정확히 직선을 그리며 갈 수가 없다. 네모난 점은 실제 KAUV가 좌표지점 도착을 알리는 좌표이다. 3번째 추정 좌표에서 디자이너 포지션 데이터와 거리가 있지만 실제로 X, Y 좌표가 (13.0639, 14.0753) 이기 때문에 처음에 설정한 1m의 오차 안에 들었기 때문에 실험 결과로는 위치제어에 성공하였다. 또한, Fig. 5.26 도 설정된 (0,0), (12,0), (12,12)의 경로를 수중에서 추적하는 것으로 설정된 경로를 따르는 AUV의 오차가 매우 적고 누적오차가 거의 없는 것을 확인하였다.

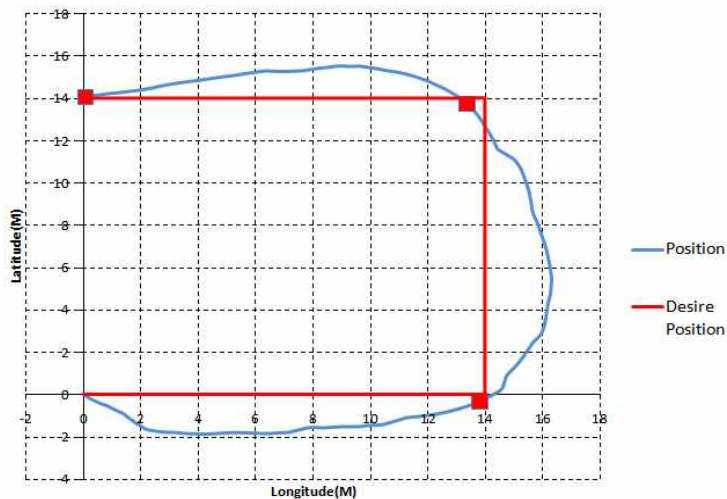


Fig. 5.25 Trajectory of KAUV

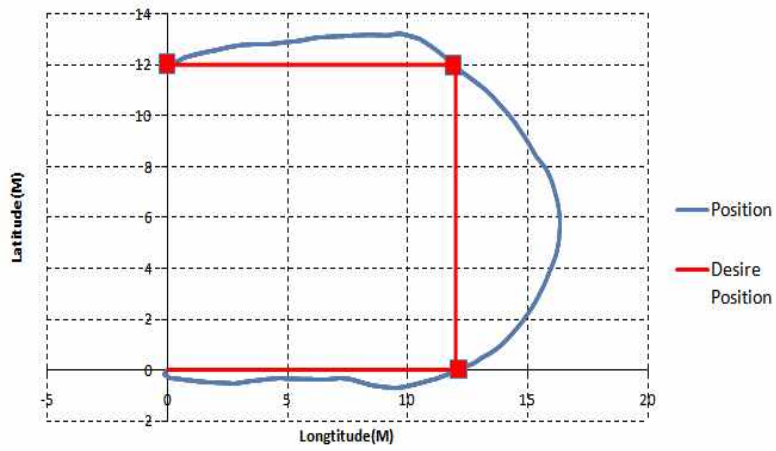


Fig. 5.26 Trajectory of KAUV



6 결론

본 연구에서는 개발된 KAUV는 기존 rudder 타입으로 수심제어를 하는 AUV와 다르게 KAUV는 weight balance actuator의 weight를 이용하여 수심제어를 하였고 KAUV의 제어를 위해 메인 컨트롤러는 임베디드 컴퓨터를 적용하였고 모터제어를 위해 모터 컨트롤러와 모터 드라이버를 개발하였다. KAUV의 항법센서로는 DVL, IMU, GPS, depth sensor로 항법 장치를 구성하였고, 비선형 시스템에 효과적인 EKF를 이용한 DVL-IMU 항법 알고리즘을 개발하였다. 여기서 DVL은 물체고정좌표계에서 항법좌표계로 변화하여 적분과정을 통해 위치정보를 구하게 된다. DVL-IMU로 구성된 복합 항법 시스템의 오차는 시간이 지남에 따라 선형적으로 증가 하게된다. 이를 보정하기 위해 보조 센서로 depth sensor, GPS를 DVL-IMU 항법 알고리즘에 위치정보를 보정하는 역할로 적용하여 복합 항법 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서는 1차적으로 제어기 시스템의 성능을 보기위해 2차원으로만 경로를 추정하였으나, 실제 수심에서 제어를 하기 위해서는 3차원으로 경로를 추정해 나가야하기 때문에 항법시스템에 수심제어를 추가하여 3차원 경로를 추정해 나가기 위해 바다에서 실험 중에 있으며 결과는 다음과 같다.

1. KAUV의 전장 시스템을 구성하였고 KAUV의 제어를 위해 Master 컨트롤러는 임베디드 컴퓨터 IEC 667 Lite를 적용하였고 Slave 컨트롤러로는 DSP320F28335를 사용하여 센서의 데이터 및 항법을 계산 하였다. 모터제어를 위해 TMS320F28035의 MCU를 사용하여 모터 드라이버를 자체 개발 및 제작하였다
2. 복합항법을 위한 H/W 센서구성과 S/W 알고리즘을 적용하여 육상과 수조, 실 해역에서의 경로 추적 시험을 통해 성능을 검증하였다.
3. DVL 테스트 장비를 구성하여 DVL테스트 결과 DVL의 이동속도를 3m/s로 하였을 때, 필터를 사용 하지 않은 평균속도는 0.30308m/s였고, 필터를 적용한 평균속도는 0.299902였다. 시험 결과는 실제 속도 값과 유사하게 DVL의 센서 출력 값이 나오는 것을 확인 할 수 있었고, 필터 적용하였을 때 노이즈를 제거하여 보다 더 실제 값에 유사하게 나오는 것을 확인하였다.
4. Rudder를 이용한 각도 추정 시험에서는 IMU에서 나오는 angle 값을 통해 목표 각도에 도달하였을 때 1도의 오차 범위에서 목표 각도를 추정하는 것

을 보아 각도 추정 실험이 성공적임을 알 수 있다.

5. Rudder 타입으로 수심제어를 하는 기존의 AUV와 다르게 KAUV는 weight balance actuator의 weight를 이동시켜 무게중심이 바뀌어 수심제어를 하였고 2.5m 수심까지 들어가는데 10s가 걸리고 1min 가량의 수심제어를 하였으며 약간의 진동이 있지만 대체로 잘 추정함을 알 수 있다

6. 실 해역에서의 경로 실험에서 (0,0)에서 시작하여 (12,0) → (12,12) → (0,12) 와 (0,0)에서 시작하여 (14,0) → (14,14) → (0,14) 이렇게 두 번의 실험에서 모두 3개의 목표 위치를 지정하였을 때 실험모두 3곳의 목표위치를 지나간 것으로 보아 경로 실험이 성공적임을 알 수 있다.



참 고 문 헌

- [1] A. Kukulya, A. Plueddemann, T. Austin, R. Stokey, M. Purcell, B. Allen, R. Littlefield, L. Freitag, P. Koski, E. Gallimore, J. Kemp, K. Newhall, J. Pietro, "Under-ice operations with a REMUS-100 AUV in the Arctic," Proc.AUV2010IEEEConference,pp.1-8,September2010.
- [2] R.P. Stokey, A. Roup, C.V. Alt, B. Allen, N. Forrester, T. Austin, R. Goldsborough, M. Purcell, F. Jaffre, G. Packard, A. Kukulya, "Development of the REMUS 600 autonomous underwater vehicle", Proc. OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference,vol.2,pp.1301-1304, 2005, 9.
- [3] Milne, P. H.(1983), Underwater acoustic positioning systems, Gulf Publishing Company.
- [4] Yun, X., Bachmann, E. R., McGhee, R.B., Whalen R. H., Roberts, R. L., Knapp R. G., Healey, A. J. and Zyda, M. J.(1999). "Testing and evaluation of an intergrated GPS/INS system for small AUV navigation", IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 24, No.3, pp. 396~404.
- [5] An, P.E., Healey, A. J., Smith, S. M. and Dunn, S.E.(1966). "New experimental results on GPS/INS navigation for Ocean Voyager 2 AUV", Proceedings of AUV'96,pp.249~255, June
- [6] Marco, D. B. and Healey, A. J.(2001). "Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV",IEEE j, of Oceanic Engineering, Vol. 26 No. 4, pp. 466~476,Oct
- [7] An, E., Healey, A. J., Park, J. and Smith S. M.(1997). "Asynchronous data fusion for AUV navigation via heuristic fuzzy filtering techniques", Proc. Of Ocean 97 Conference, Vol. 1, pp. 397~402, Oct.
- [8] Woolven, S. and Field, M.(1998). "POS/SV - an aided inertial navigation system for submersible vehicles," Proc. Of Oceans '98 Conference, Vol. 1, pp. 103~107, Oct.
- [9] M.C. Park, Y.S. Joo, J.I. Kim, J.W. Kim, J.S. Woo, S.H. Ji, Y.S. Jung, B.H. Lee, "Design and experiment of coastal autonomous underwater vehicle OKPO-300", Proc.2007 Fall Conference, December2007.
- [10] 강철우, 유명민, 박찬국, "변형된 오일러각 기반의 칼만 필터를 이용한 자세 추정 성능 향상", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems Vol, 14, No. 9, September 2008
- [11] Ppoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Process, Mc-Graw Hill

- [12] Maybeck, Peter S., Stochastic Models, Estimation, and Control, Vol.1
- [13] Alberto Leon-Garcia, Probability and Random Process for Electrical
- [14] Patrick Billingsley, Probability and Measure, Ed. Wiley, 1979
- [15] Lewis, F.L., Optimal Estimation, John Wiley & Sons, 1986
- [16] Branko Ristic et al, Beyond the Kalman Filter, ARTECH House, 2004
- [17] An Introduction to the Kalman Filter, Greg Welch and Gary Bishop
- [18] Titerton, David H., Weston, Jessie L, Strapdown Inertial Navigation Technology, Second Edition

