



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

가변 ROV의 HAUV타입 호버링 제어및
수중 항법 시스템 연구

Hovering Control of Convertible ROV and Study of
Underwater Navigation System



지도교수 최 형 식

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

정 상 기

本 論 文 을 丁 相 基 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로
認 准 함 .

위 원 장 조 종 래 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 해 박 권 하 (인)

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

그림목차

표 목차

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구 목적.....	1
제 2 장 가변 ROV의 기구부 구성.....	3
2.1 가변 ROV의 기구부 구성.....	3
2.2 추진기 의 성능 검증.....	6
2.3 추진기 의 성능 결과.....	8
2.4 추진기의 CFD 해석.....	10
제 3 장 제어 시스템의 설계.....	16
3.1 HAUV의 모델링.....	16
3.2 HAUV의 추력계산.....	17
3.3 제어시스템의 구성.....	19
3.3.1 전원시스템의 설계.....	20
3.3.2 컨트롤시스템의 설계.....	23
3.3.3 센서 시스템의 구성.....	27
제 4 장 수중 항법 알고리즘 연구	38
4.1 수중 항법 알고리즘 연구.....	38
4.2 The extended kalman filter (EKF).....	43
제 5 장 HAUV의 호버링 및 항법시스템 의 성능 시험	44
5.1 호버링 제어 알고리즘 및 성능시험.....	44
5.2 HAUV의 수중 항법 알고리즘 및 성능시험.....	50
제 4 장 결론	58
참 고 문 헌.....	59

Hovering Control of Convertible ROV and Study of Underwater Navigation System

JEONG SANG KI

Department of Mechanical Engineering

*Graduate School of
Korea Maritime University*



Abstract

In this paper, a study of a new convertible, six degree of freedom(DOF) unmanned underwater robot, which can be a Remotely Operated Vehicle (ROV) or an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) depending on the purpose of the underwater task, is presented. The design and development of the architecture of the developed control system for the ROV and the AUV are presented. The thrusting system of an AUV is analyzed. For navigation, a sensor fusion board, which can process various sensor signals to estimate and identify the correct states of the vehicle, is developed, and a total control system including the extended kalman filter (EKF) is designed and developed. For the AUV, depth and orientation control experiments in the water tank are performed and experiment results are presented and discussed.

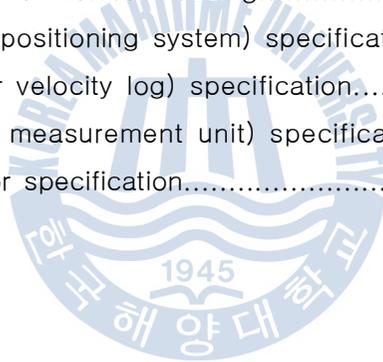
그림 목 차

Fig. 2.1 appearance of convertible ROV.....	3
Fig. 2.2 Internal view of the CROV.....	4
Fig. 2.3 modular parts for AUV and ROV.....	4
Fig. 2.4 assembly process of ROV mode.....	5
Fig. 2.5 assembly process of AUV mode.....	5
Fig. 2.6 configuration of experimental apparatus.....	6
Fig. 2.7 configuration of experimental apparatus.....	7
Fig. 2.8 model 1020 thruster.....	7
Fig. 2.9 thrust test by 300W thruster	9
Fig. 2.10 board circuit and block diagram of the motor controller.....	9
Fig. 2.11 grid of the computational domain.....	11
Fig. 2.12 MRF (Multiple Frame Reference).....	12
Fig. 2.13 velocity and pressure distribution on the propeller plane (1300rpm).....	13
Fig. 2.14 velocity and pressure distribution on the mid-side plane (1300rpm).....	14
Fig. 2.15 vortex and streamline on the mid-side plane (1300rpm).....	14
Fig. 2.16 comparison thrust tests and CFD analysis results.....	15
Fig. 3.1 HAUV의 3D modeling.....	17
Fig. 3.2 frontal projected area of the AUV.....	18
Fig. 3.3 control system of AUV.....	19
Fig. 3.4 DC-DC converters (PAF600F280-48).....	20
Fig. 3.5 The power circuit.....	22
Fig. 3.6 The power housing.....	22
Fig. 3.7 embedded system-IEC 667 Lite.....	23
Fig. 3.8 thruster Control Board.....	24
Fig. 3.9 The control housing.....	25
Fig. 3.10 diagram of the control housing.....	26
Fig. 3.11 The sensor control system.....	28
Fig. 3.12 GPS and Antenna.....	29
Fig. 3.13 DVL (doppler velocity log).....	31

Fig. 3.14 IMU(inertial measurement unit).....	32
Fig. 3.15 depth sensor.....	34
Fig. 3.16 navigation Controller(DSP 28335).....	35
Fig. 3.17 atmega 8 circuit.....	36
Fig. 3.18 navigation board.....	37
Fig. 4.1 navigation coordinate.....	38
Fig. 4.2 body coordinate.....	39
Fig. 4.3 The operation of the extended kalman filter.....	43
Fig. 5.1 The fusion control system of tilt and depth.....	44
Fig. 5.2 sensors used to control of hovering.....	44
Fig. 5.3 The results of the HAUV depth.....	45
Fig. 5.4 The actual depth test photo(in the water pool).....	45
Fig. 5.5 The speed test results of HAUV.....	46
Fig. 5.6 The 30 ° pitch control of HAUV.....	47
Fig. 5.7 The actual 30 ° pitch control test photo(in water pool).....	47
Fig. 5.8 The 30 ° roll control of HAUV.....	48
Fig. 5.9 The actual 30 ° roll control test photo(in water pool).....	48
Fig. 5.10 The 30 ° roll and pitch control of HAUV.....	48
Fig. 5.11The actual 30 ° roll and pitch control test photo(in water pool).....	49
Fig. 5.12 navigation system	50
Fig. 5.13 H/W composition of navigation system at surface.....	51
Fig. 5.14 S/W composition of navigation system at underwater.....	52
Fig. 5.15 HAUV navigation system.....	52
Fig. 5.16 S/W composition of navigation system at underwater.....	55
Fig. 5.17 experiment at stop of HAUV.....	56
Fig. 5.18 way point test using the GPS, IMU.....	56

표 목 차

Table. 2.1 specification of load cell.....	7
Table. 2.2 specification of Model 1020 thruster.....	8
Table. 2.3 thrust test results.....	10
Table. 2.4 CFD results for forward direction.....	12
Table. 2.5 CFD results for backward direction	13
Table. 3.1 specification of DC-DC converters.....	21
Table. 3.2 specification of embedded system-IEC 667 Lite.....	24
Table. 3.3 specification of control housing.....	26
Table. 3.4 GPS(global positioning system) specification.....	30
Table. 3.5 DVL(doppler velocity log) specification.....	31
Table. 3.6 IMU(inertial measurement unit) specification.....	33
Table. 3.7 depth sensor specification.....	33



1. 서론

1.1 연구의 필요성

최근 해양에 대한 관심이 높아지면서 해양 탐사에 관해 관심이 높아지고 있다. 더불어 수중을 탐사하고 해중에서 작업을 수행할 수 있는 수중 무인화 장비의 활용도는 더욱더 커지고 있다. 수중 무인 장비로는 원격조정 무인잠수정 (ROV: Remotely Operated Vehicle), 자율무인잠수정 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) 등이 있다.

무인잠수정은 수중이라는 환경에서 운용되며 주어진 임무를 수행하기 위해서는 수중에서 자신의 위치를 정확히 파악할 수 있는 항법기술이 필수적으로 요구되며 특히 우리나라 연근해와 같이 조류가 강한 곳에서는 그 중요성이 더욱 커진다.[1]

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. 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.

1.2 연구의 목적

본 연구에서는 수중에서 작업과 주어진 임무를 수행하기 위해 관성 센서와 DVL 및 GPS 센서를 융합하는 복합항법시스템이 요구되며, 가변 ROV의 호버링 AUV 타입에 지자기 센서(IMU) 와 depth sensor의 유기적인 상호 작용을 통한 수중장비의 수심제어 및 자세제어를 연구하여 강인한 수중 자세 제어 알고리즘 연구 및 제어 시스템 연구를 수행하고 호버링 타입의 AUV의 호

버림에 최적화 된 데이터를 기반으로 향후 수중 장비의 기본 데이터를 완성할 것이다. 또한 DVL 과 지자계 센서(IMU), GPS의 센서를 사용하여 신뢰도 높은 데이터를 얻을 수 있는 수중 항법 시스템의 연구를 수행하여 연근해 및 심해에서 임무 수행 및 수중작업이 가능한 수중로봇의 정밀한 제어를 위해 연구하고자 한다.[2]



2. 가변 ROV의 기구부 구성

2.1 가변 ROV의 기구부 구성



(a) ROV mode



(a) AUV mode

Fig 2.1 appearance of Convertible ROV

가변 ROV는 수중에서의 해류나 선체의 유체저항을 최소화하기 위해 유선형의 선체로 설계하였고 수평방향의 자기위치를 강인하게 유지하기 위하여 4대의 추진기를 대칭적으로 구성하도록 설계하였다. 또한 6 자유도 운동제어에 적합하도록 대칭으로 3대의 수중추진기를 Fig 2.2과 같이 설계하였다.[3]

또한 각 추진기는 최대 추력을 낼 수 있게 최대한 유로를 확보 하였으며, roll 모션시 최대 복원력을 낼 수 있도록 선체의 좌/우 측면 끝에 근점 배치하였다.

CROV는 Fig 2.2 와 같이 전체 기구부 구성은 선체, 제어하우징, 전원하우징,

배터리 하우징, 테더케이블, 매니플레이터, 추진기, DVL, USBL로 설계하였다. AUV모드로 전환 시 기본 구성품은 매니플레이터를 제외한 나머지 부분은 ROV 모드와 동일하다.



Fig 2.2 Internal view of the CROV



Fig 2.3 modular parts for AUV and ROV

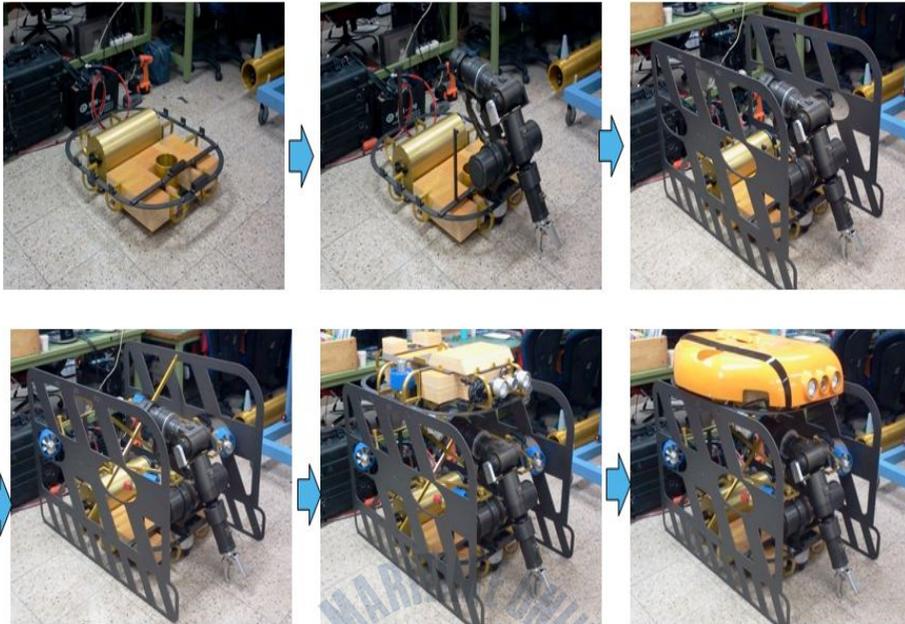


Fig 2.4 assembly Process of ROV Mode

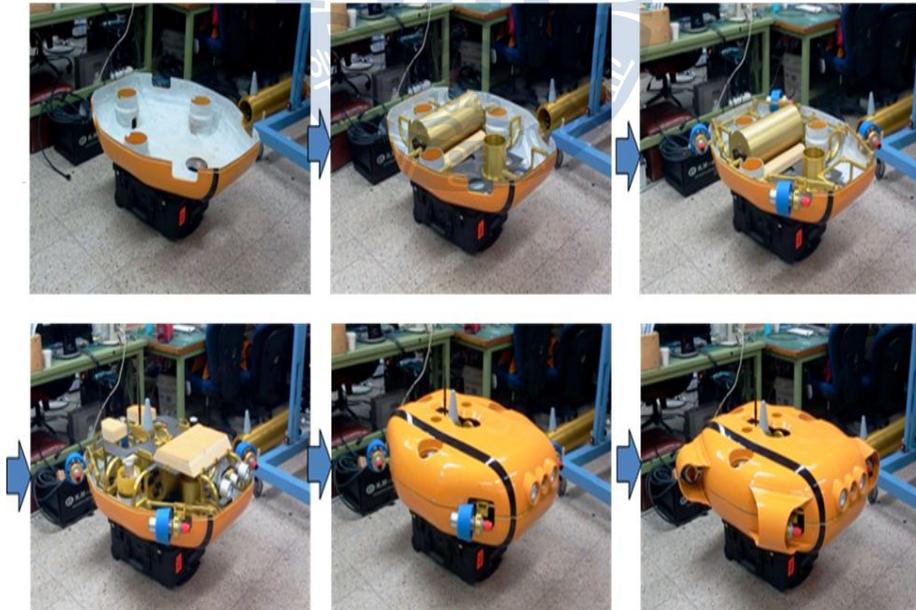


Fig 2.5 assembly process of AUV mode

각 파트의 모듈화 설계로 수중 장비의 타입 변형 및 유지 관리에 효율성을 높

였다. Fig 2.3은 가변 ROV의 주요 구성품의 실제 사진이며 Fig 2.4 와 Fig 2.5는 각 타입의 변형을 순차적으로 나열 하였다.

2.2 추진기 의 성능 검증

자율무인잠수정용으로 고안된 고효율 저 전력 추진기의 모터의 추력 테스트를 위해 추력 테스트 장치를 설계하여 제작하였다. 추력 테스트 장치의 형상은 Fig. 2.6과 같다.[4][5]



Fig 2.6 configuration of Experimental apparatus

추력 테스트를 위해 Fig 2.7와 같은 로드 셀을 사용 하여 추진체의 정지추력을 측정 하였으며, 사용 로드 셀의 사양은 Table 2.1과 같다.



Fig 2.7 configuration of Experimental apparatus

Table 2.1 Specification of load cell

Model	Rated Capacity	Zero balance	Rated output
UMM-200K	0~1.961kN (200 kgf)	±0.06 mV/V	2mV/V±0.01 mV/V

추력 시험장치의 정확성을 검증하기 위해서 실험을 별개의 테스트를 진행하였다. 먼저, 시험장치의 레일 위에 위치한 추진기의 고정 지그를 수직방향에 위치한 도르래를 스틸 와이어로 통과 시킨 후 아래 방향으로 5kg과 10kg의 무게를 고정하여 마찰계수를 계산할 수 있는 시험장치의 총 마찰력을 측정하였다.

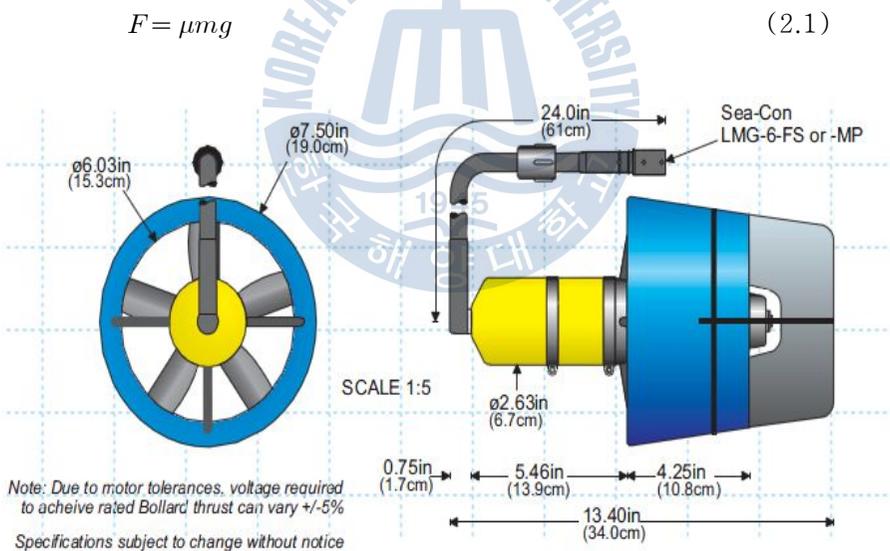


Fig 2.8 model 1020 thruster

위 식에서 F는 5kg과 10kg의 무게에서의 측정치로 실험 시 5kg은 3.5kg~4kg, 10kg은 7.4kg~7.8kg 이 측정되었다. 따라서 각각의 측정치를 사용하여 운동 마찰계수를 계산하였다.[6]

위 실험결과에서의 운동마찰계수는 약 0.72~0.73이라고 계산되었다. 이 운동마찰계수는 현재 상용 제품으로 출시되어 있는 추진진기를 이용하여 검증하였다. 사용된 사용 추진기는 'Tecnadyne사'의 'model 1020 thruster'이며 이의 외형과 사양은 Fig 2.7 와 Table 2.2와 같다.

Table 2.2 specification of model 1020 thruster

Bollard Output	Input	Weight
50lbf(22.7kgf) forward	150VDC 6.1A	6.0lb(2.7kgf)in air
32lbf(14.7kgf) forward		4,5lb(2.0kgf)in water

2.3 추진기의 성능 검증 결과

300W급 추진기 모터의 추력 측정을 위한 모터 작업은 'ATmega128을 사용 하였다. 300W급 추진기의 모터는 추진기 내에 별도의 BLDC 모터 드라이브가 내장되어 있기 때문에 그 드라이브에 맞는 시퀀스를 통신을 이용해 외부에서 명령을 보내야 한다. 추진기내에 내장 되어있는 BLDC 모터 드라이브를 Fig 2.9 에 나타내었다.[7][8][9]

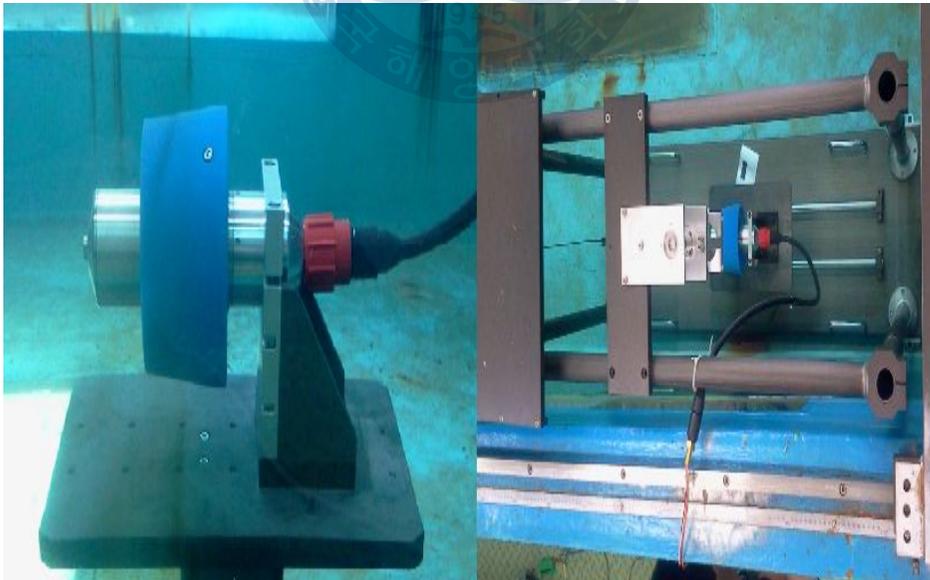


Fig 2.9 thrust test by 300W thruster

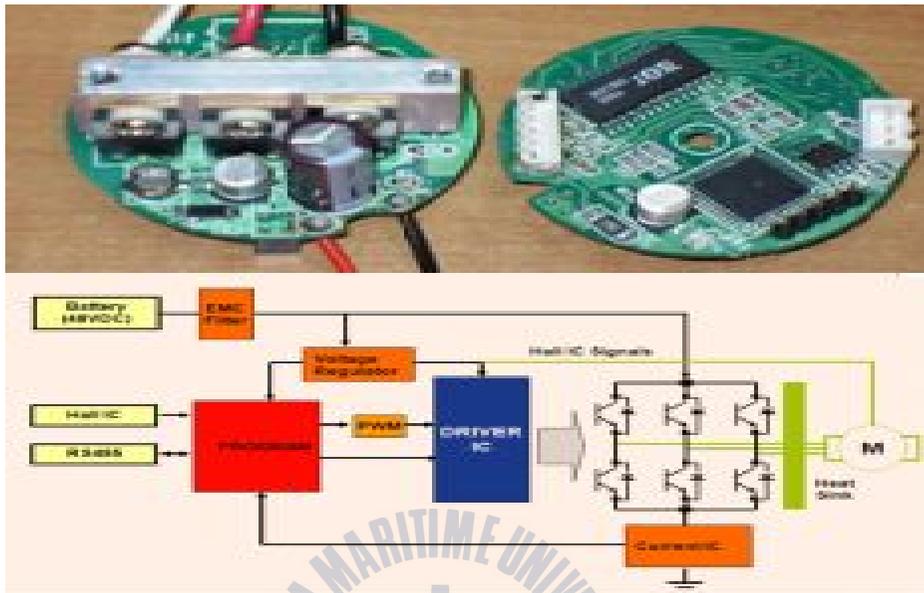


Fig 2.10 board circuit and block diagram of the motor controller

Table 2.3 Thrust test results

Forward Direction			Backward Direction		
Current(A)	rpm	Thrust [N]	Current(A)	rpm	Thrust [N]
1	626	4.12	1	549	0.98
2	845	5.00	2	655	2.55
3	975	10.79	3	749	4.12
4	1084	13.93	4	864	8.04
5	1152	15.70	5	968	11.18
6	1200	19.62	6	1056	13.24
7	1251	21.97	7	1132	14.22
8	1289	24.03	8	1185	14.91
9	1291	25.51	9	1215	15.70
10	1324	26.98	10	1242	16.87

2.4 추진기의 CFD 해석

해석을 위하여 설계된 추진기를 3D로 모델링 하였다. 추진기의 직경(D)는 111.15mm (덕트포함직경 : 약 141.72mm), 허브의 직경은 54mm, 피치는 약 12.8mm이며, 덕트화 추진기의 간격은 4.5mm이다.

수치해석에 사용된 덕트 프로펠러의 격자모형은 Fig 2.11 에 나타내었다. 계산에 사용된 격자수는 총 5,281,598개 이며, 격자는 CFX 전용 격자 생성기인 CFX-Mesh를 이용하여 생성하였으며, 벽 근처에서의 격자수를 줄이기 위한 경계층을 고려하기 위하여 Hexa 격자로 생성하였다. [10]

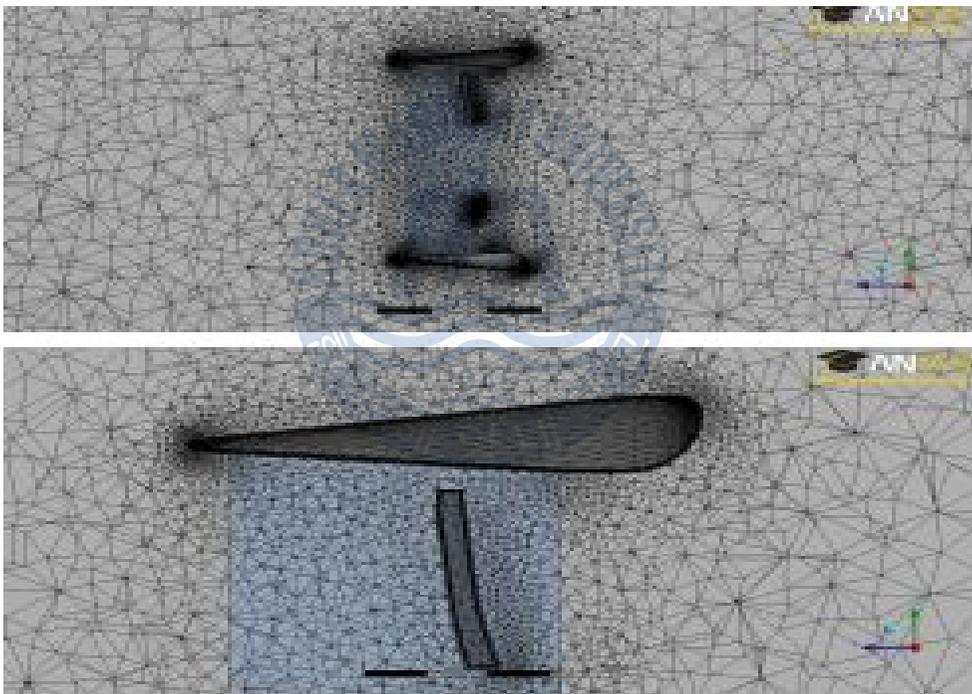


Fig 2.11 grid of the computational domain

CFD 해석은 비압축성 난류유동의 해석에 3차원 Reynolds averaged Navier-Stocks (RANS) 방정식과 연속 방정식으로 지배방정식으로 하며 이는 유한체적법에 의하여 이산화 된다. (참고문헌). 난류모델은 CFX에서 제공하는 SST 난류모델을 사용하였으며, 벽 근처에서의 격자수를 줄이기 위해 수정된 벽법칙을 사용하였다. 계산된 y^+ 가 층류저층의

경계면의 값인 10이하가 되지 않도록 제한하여 모든 격자점이 층류 저층 바깥에 위치하도록 하였다.

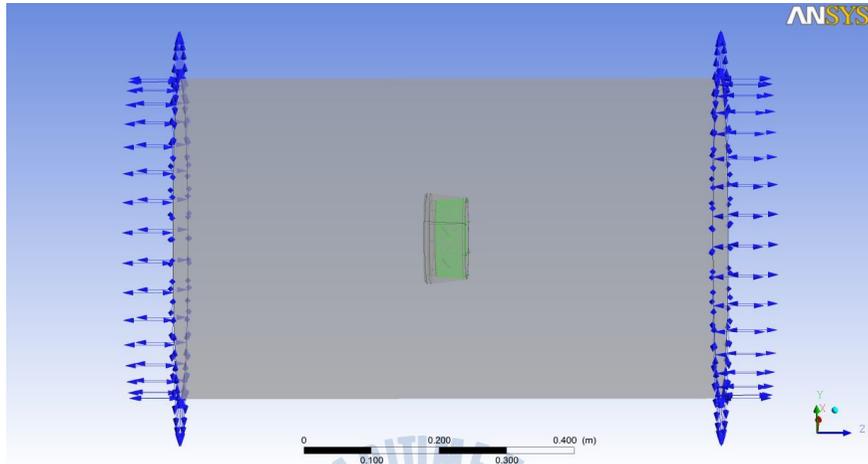


Fig 2.12 MRF (Multiple Frame Reference)

CFD 해석으로 전진방향으로 정지상태 에서 정회전과 역회전에 대하여 600rpm~1300rpm까지의 각 rpm별 추력 및 토오크를 구하였다. CFD 해석결과를 Table 2.4와 Table 2.5에 각각 나타내었다.

Table 2.4 CFD results for forward direction

Table 2.5 CFD results for backward direction

rpm	Thrust (All) [N]	Thrust (Blade) [N]	Thrust (Duct) [N]	Torque (Blades) [N·m]
600	6.852	4.918	1.934	-0.1980
700	9.004	6.739	2.265	-0.2660
800	11.759	8.737	3.022	-0.3483
900	15.136	10.927	4.209	-0.4351
1000	18.957	14.014	4.943	-0.5461
1100	23.054	16.878	6.176	-0.6638
1200	26.920	19.685	7.235	-0.7849
1300	31.260	23.411	7.849	-0.9084

rpm	Thrust (All) [N]	Thrust (Blade) [N]	Thrust (Duct) [N]	Torque (Blades) [N·m]
600	-6.718	-4.552	-2.167	0.1624
700	-9.044	-6.117	-2.927	0.2175
800	-11.864	-8.023	-3.841	0.2846
900	-15.034	-10.160	-4.874	0.3586
1000	-18.648	-12.600	-6.048	0.4427
1100	-22.648	-15.350	-7.298	0.5389
1200	-26.970	-18.428	-8.542	0.6482
1300	-31.672	-21.833	-9.839	0.7681

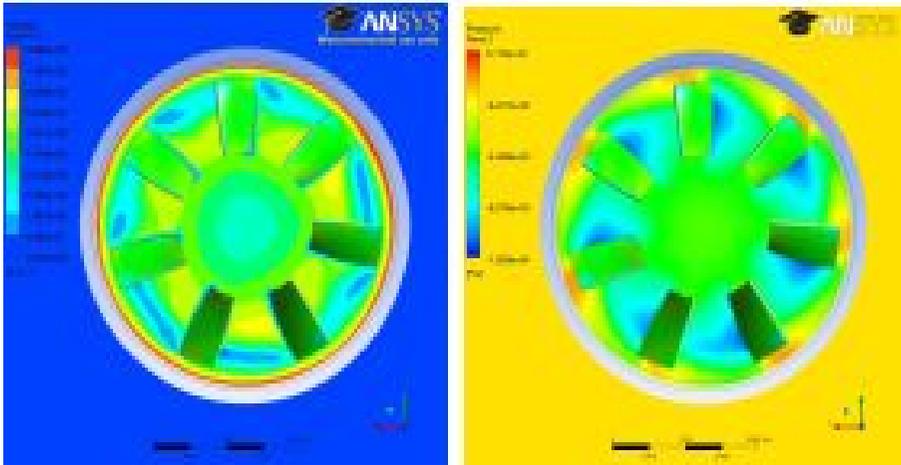


Fig 2.13 velocity and pressure distribution on the propeller plane (1300rpm)

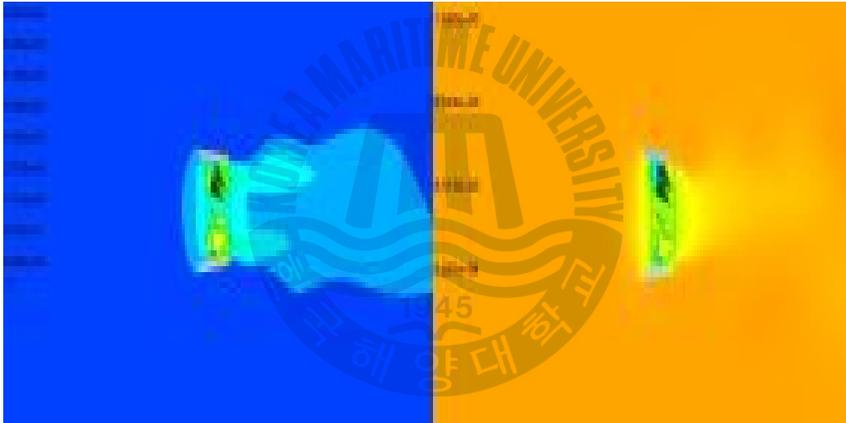


Fig 2.14 velocity and pressure distribution on the mid-side plane (1300rpm)

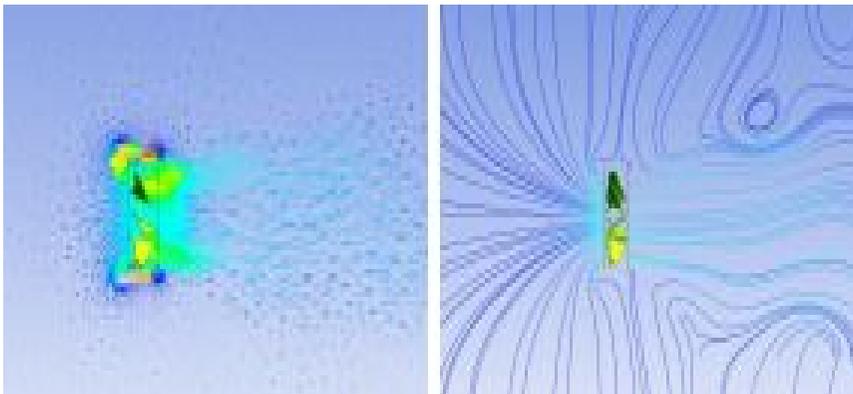


Fig 2.15 vortex and streamline on the mid-side plane (1300rpm)

Fig 2.13, Fig 2.14 는 스러스터의 정방향, 역방향의 속도에 따른 압력 분포를 나타낸 CFD 해석 결과로 정방향의 추진 속도와 압력이 역방향 보다 더 크게 해석 되었다. 또한 Fig 2.15는 스러스터의 추진 시 발생하는 소용돌이를 나타내었다. 실험결과와 해석결과의 비교를 Fig 2.16에 나타내었다.

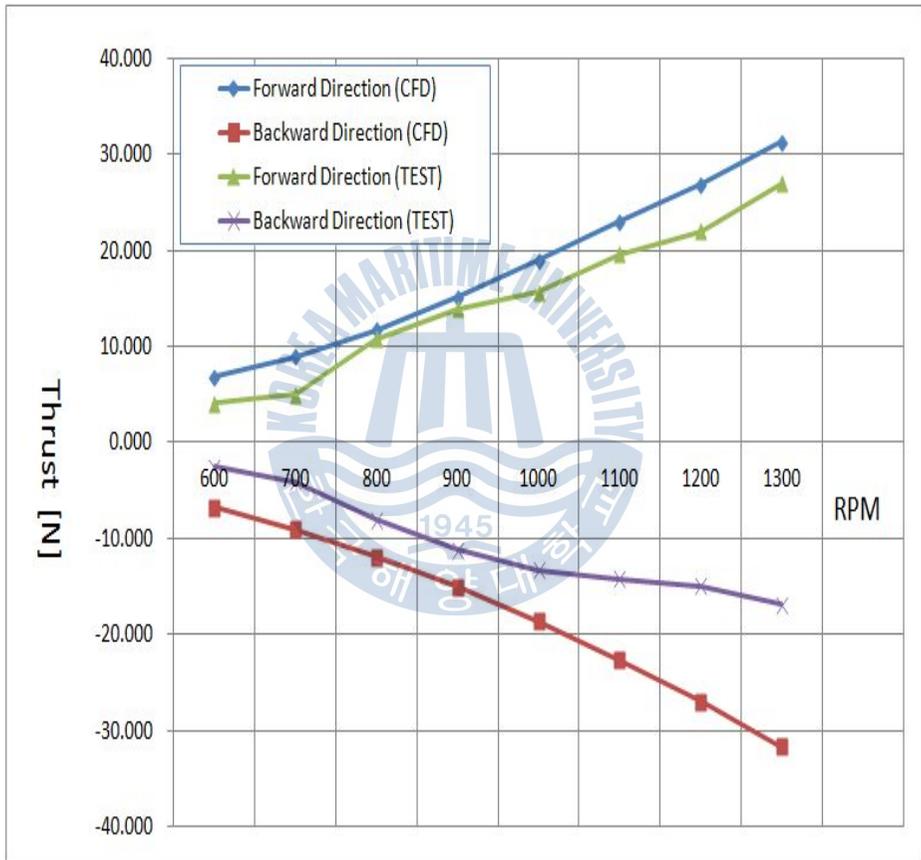


Fig 2.16 comparison thrust tests and CFD analysis results

정방향에 대한 결과는 10%내외로서 비교적 잘 일치하고 있으나 역방향은 회전 수가 증가할수록 미세한 차이가 발생하고 있다. 이는 정방향의 테스트와는 사뭇 다른 결과를 나타내는데, 그것은 테스트 장비의 지그부분을 보면 오차의 의미를 알 수 있다. Fig 2.6의 지그부분을 보면 정방향 측정 시 지그와 추진기 사이의 공간으로 유체가 유입 되고 후방으로 유체를 밀어 내는 구조로 되어 있지만 역방향 측정

시 정방향 과는 반대의 경우로 후방으로의 유체의 유입 후 지그와 추진기 사이로 유체를 밀어 내는 구조로 되어있다. 따라서 유체의 흐름이 정방향 측정시와는 다르게 지그에 영향을 받게 되는 것이다. 해석의 결과는 순수 추진체의 추력 해석 값이기 때문에 외부에서의 유체 흐름 방해 요소를 계산하지 않은 것이다. 따라서 역방향의 데이터가 해석결과와의 오차가 발생하는 것으로 판단된다.

3. 제어 시스템의 설계

3.1 HAUV의 모델링

HAUV의 6자유도 운동방정식을 body-fixed coordinates에 의해 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= \sum X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(pr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= \sum Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] &= \sum Z \\
 I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K \\
 I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M \\
 I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\
 + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= \sum N
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

여기서 Eq. 3 는 행렬식으로 간략히 표현된다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}) + \mathbf{D}(\mathbf{v}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \tag{3.2}$$

여기서,

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A, \quad \mathbf{C} = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A$$

\mathbf{M}_{RB} : The rigid-body inertia matrix

\mathbf{M}_A : Added inertia matrix

\mathbf{C}_{RB} : The rigid-body Coriolis and centripetal matrix

\mathbf{C}_A : The added coriolis matrix

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$: 물체 중심의 속도/각속도 벡터

$\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$: 외력과 모멘트 벡터

$$D = D_p(v) + D_s(v) + D_w(v) + D_M(v) \quad :$$

$D_p(v)$: The hydrodynamic damping matrix is mainly caused by radiation-induced potential damping,

$D_s(v)$: linear skin friction,

$D_w(v)$: wave drift damping

$D_M(v)$: damping due to vortex shedding

$g(\eta)$: Gravity and buoyancy vector (forces and moments)

HAUV의 동작제어를 위한 입력 벡터 τ 와 여분의 추진 스러스트 간의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau = B \cdot u \quad (3.3)$$

여기서 입력벡터 $u = [F1 \ F2 \ F3 \ F4 \ F5 \ F6 \ F7]^T$

B 행렬은 추진체 배열에 대한 제어입력행렬이다. 추진체가 제어자유도보다 많아서 최적분배를 위한 행렬식을 다음과 같이 설계된다.

$$u = B_w^+ \cdot \tau \quad (3.4)$$

여기서 $B_w^+ = W^{-1} B^T (B W^{-1} B^T)^{-1}$

3.2 HAUV의 추력계산

무인 잠수정은 수중에서 받는 항력보다 큰 출력을 낼 수 있어야 한다. 외란을 무시하였을 때 수중에서 수평 추진기의 사용이 가능한지를 판단하기 위해 선체 형상을 입방체 형태로 가정, 수평 추진기가 최대 추력을 낸다고 가정하여 계산하였다. [11]

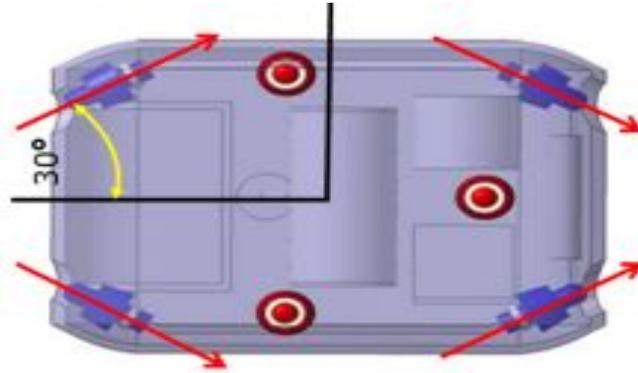


Fig 3.1 HAUV의 3D modeling

Fig 3.1 와 같이 최대 추력 5kg의 모터 4개를 30도의 각도로 비틀어 달았을 경우 추력은 식 (3.1)과 같이 계산 할 수 있다.

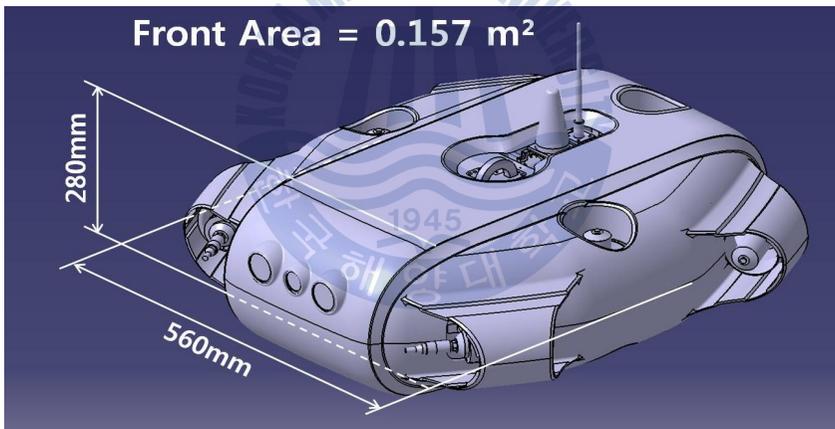


Fig 3.2 frontal projected area of the AUV

$$V = \sqrt{\frac{F \times g}{0.5 \times \rho \times C_d \times A}} \quad (3.5)$$

$F = 5kg \times \cos 30^\circ \times 4 = 17.3kg$, C_d 는 항력계수로 AUV의 전면을 반구 형태로 설계하여 Figure 6같이 모델링하여 0.8로 가정, ρ 평균 바다 밀도인 $1025kg/m^3$, A 는 AUV 전면 투영 면적으로 $0.161m^2$ 이다. 식 (3.1)을 계산하면 HAUV의 최대 속도는 $1.6m/s$ 이고 대략 $3Knot$ 의 수평 추진속도를

가진다.[12]

3.3. 제어시스템의 구성

HAUV의 제어시스템은 선상으로 전송되는 센서의 데이터가 직접 제어 회로에 전송되어 센서 데이터의 연산을 통해 현재 위치를 추정, 선체의 상태와 경로를 제어하게 된다. ROV의 제어 회로에 DSP프로세서인 TMS320c 28335를 사용하여 데이터 수신회로를 결합하게 된다. HAUV는 주행 중 수집된 영상을 메모리에 저장하여 회수 후 영상 데이터를 육상에서 분석할 수 있도록 영상 저장장치를 따로 제어하우징에 장착하였다.[13]

HAUV의 제어기는 ATxmega128A1을 사용하여 제작하였다. sensor board와의 통신 레벨을 맞추기 위해 control board 로 전송되는 Navigation data를 TTL 레벨의 통신으로 변환 후 다시 3.3V 레벨의 통신으로 변환하였다. 제어시스템은 Fig 3.3과 같다.

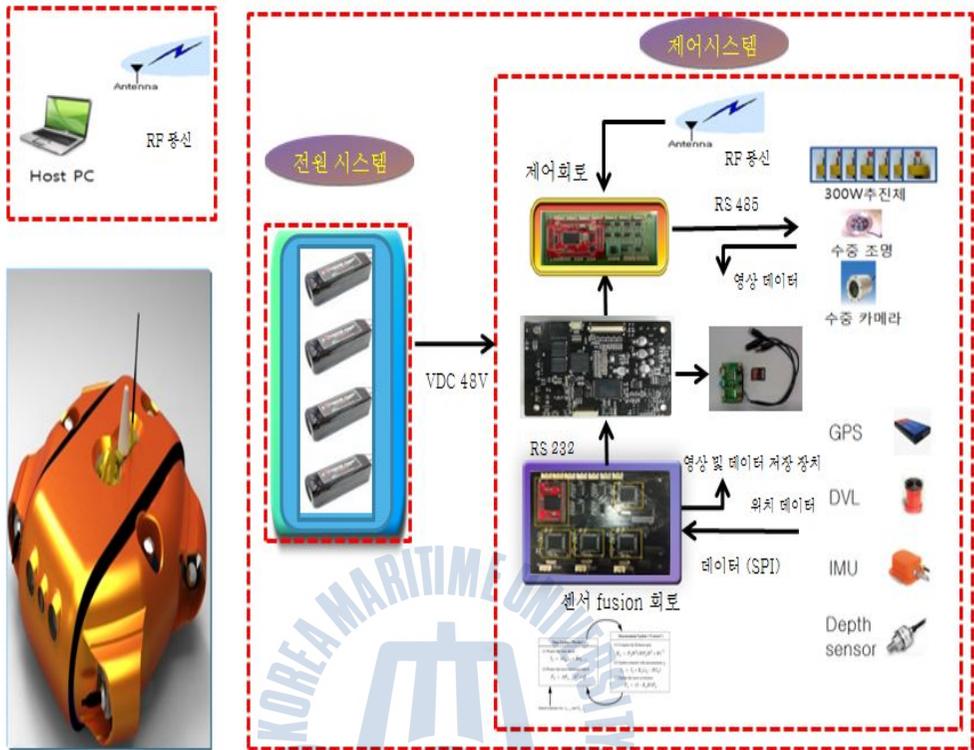


Fig 3.3 control system of AUV

3.3.1 전원시스템의 구성



Fig 3.4 DC-DC converters (PAF600F280-48)

가변 ROV는 선상에서 VDC 280V를 인가 받아 전원 하우징에서 추진체 및 각 카메라, 조명, 각종센서와 제어 회로에 필요한 전압을 얻기 위해 전압 강하와 전압 안정화 회로로 구성하였다. VDC 300V를 48V로 변환하여 제어 하우징에 전압을 인가하여 다시 24V, 12V, 5V 로 각각 전압을 강하하여 각 구성부에 전원을 공급하였다. 전원 하우징을 구성하는 power circuit은 Lambda 사의 PAF600F280-48 모델의 DC-DC와 전원의 안정적인 공급을 위해 charge회로 및 보호회로를 사용하여 구성하였다. HAUV는 배터리를 사용하여 구동 되는 타입이지만 테스트 버전에서는 ROV타입의 전원장치를 이용하여 외부의 전원라인에서 전원만을 공급 받는다.

Table 3.1 specification of DC-DC converters

PAF450F280 Specifications

ITEMS/UNITS		MODEL	PAF450F280-12	PAF450F280-24	PAF450F280-28	PAF450F280-48
Input	Voltage Range	V	DC200 - 400			
	Efficiency (typ) (*1)	%	90	91		
	Current (typ) (*1)	A	1.81	1.79	1.81	1.79
Output	Nominal Voltage	VDC	12	24	28	48
	Maximum Current	A	38	19	16.5	9.5
	Maximum Power	W	456		462	456
	Voltage Setting Accuracy (*1)	%	±1			
	Maximum Line Regulation (*2)	mV	48	56		96
	Maximum Load Regulation (*3)	mV	48	56		96
	Temperature Coefficient		0.02%/°C			
	Maximum Ripple & Noise (*9)	mV/p-p	120	240	280	480
Function	Voltage Adjustable Range (*9)		-40% / +20%			
	Over Current Protection (*4)		105% - 140%			
	Over Voltage Protection (*5)		125% - 145%			
	Remote Sensing (*8)		Possible			
	Remote ON/OFF Control (*8)		Possible (SHORT: ON OPEN: OFF)			
	Parallel Operation (*8)		Possible			
Environment	Series Operation (*8)		Possible			
	Operating Temperature (*6)	°C	-40 to +100(Baseplate) Ambient Temperature min=-40			
	Storage Temperature	°C	-40 to +100			
	Operating Humidity	%RH	5 - 95 (No dewdrop)			
	Storage Humidity	%RH	5 - 95 (No dewdrop)			
	Vibration		At no operating, 10-55Hz (sweep for 1min.) Amplitude 0.825mm constant (maximum 49.0m/s²) X, Y, Z 1 hour each			
	Shock		196.1m/s²			
	Cooling (*7)		Conduction cooled			
Isolation	Withstand Voltage		Input-Output: 3.0kVAC, Input-Baseplate: 2.5kVAC(20mA) 1min Output-Baseplate: 500VDC 1min			
	Isolation Resistance		Output to Baseplate 500VDC more than 100MΩ(25° C, 70%RH)			
Standards	Safety Standards		Approved by UL60950-1, CSA C22.2 No.60950-1, EN60950-1			
Mechanical	Weight (typ)	g	200			
	Size (W x H x D)	mm	61 x 12.7 x 116.8 (Refer to outline drawing)			

DC-DC를 사용하여 효율 공간사용과 안정적인 전압을 사용하기 위해 파워 서플라이 제작하였다. 전원의 안정적인 공급을 위해 charge회로 및 보호회로를 사용하여 구성하였다.

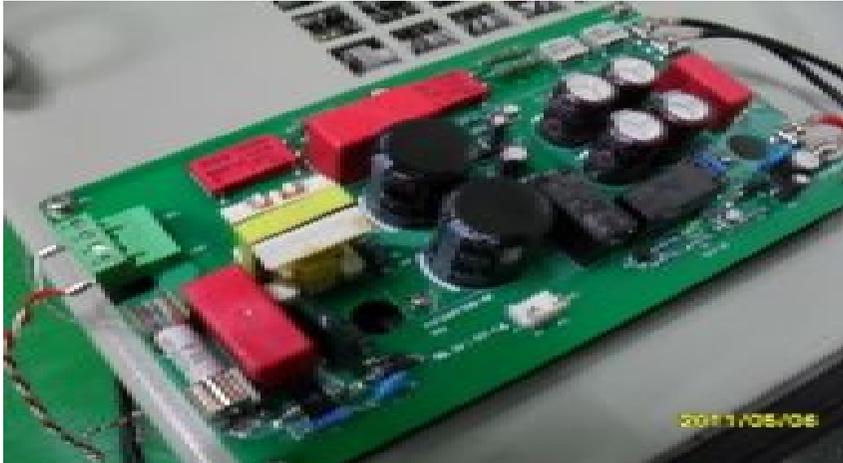


Fig 3.5 The power circuit

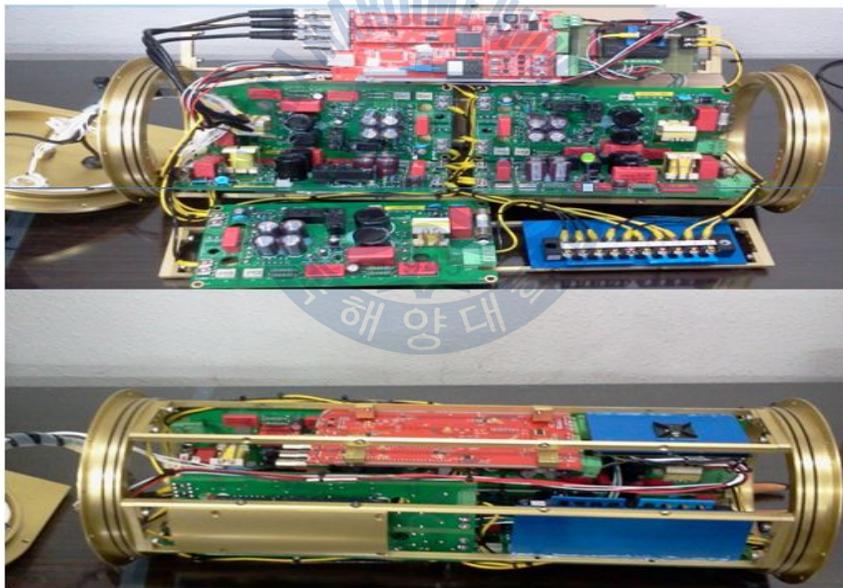


Fig 3.6 The power housing

Fig 3.5 와 Fig 3.6은 가변 ROV의 전원 하우징의 실제 모듈이며, 가변ROV의 ROV모드 시 주전원으로 사용 되며 실제 AUV모드에서는 배터리 하우징으로 사용 되며 power circuit을 제거 후 배터리가 채워 질 공간이다. 본 논문에서는 테스트 중 모델로써 선상 전원을 그대로 사용한다.

3.3.2 제어시스템의 구성[16]

제어시스템은 크게 3부분으로 구성 되어있다. 스러스터 제어용 ATxmega128A1 board, 항법 시스템의 연산 및 항법센서의 데이터를 받아 처리하는 DSP TMS320F28035 board, 이 두 시스템을 연결하는 middle control board인 ARM 11 Embedded board 이다.

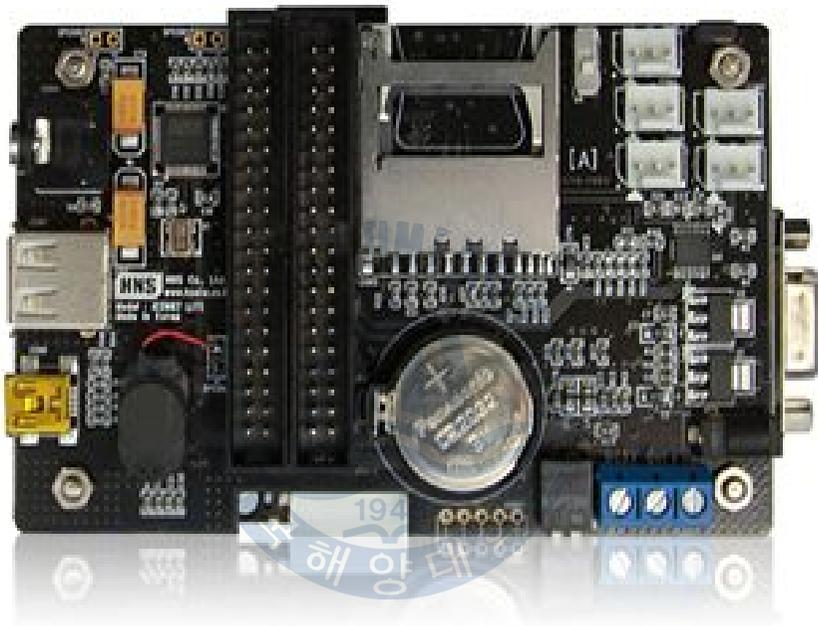


Fig 3.7 embedded system-IEC 667 Lite

HAUV 전반적인 제어를 위해 임베디드 컴퓨터를 사용하여 HAUV를 제어 하였다. 임베디드 컴퓨터는 Windows CE 6.0 기반으로 사용자가 쉽게 효율적으로 시스템의 성능을 설정할 수 있고, 쉽게 운용 알고리즘을 교체할 수 있다. 임베디드 컴퓨터의 제원은 Table 3.2과 같다.

Table 3.2 specification of 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	
	RTC	RTC	
	power	DC 5V	
	Operating temperature	-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	

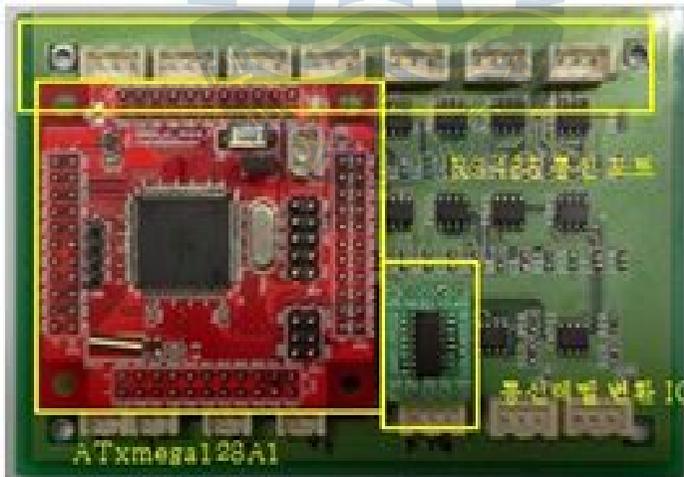


Fig 3.8 thruster control board

HAUV의 추진체의 제어를 위해 개발한 추진체 제어용 보드로 ATxmega128A1을 사용하여 각 추진체에 센서 보드의 데이터를 받아 추진체를 제어 하는 기능을 담당한다. 각 추진체는 RS-485통신을 이용하여 thruster control board 와

통신을 하며 각 스러스터는 고유의 아이디가 설정 되어있어 안정적인 제어를 가능하게 설계하였다.

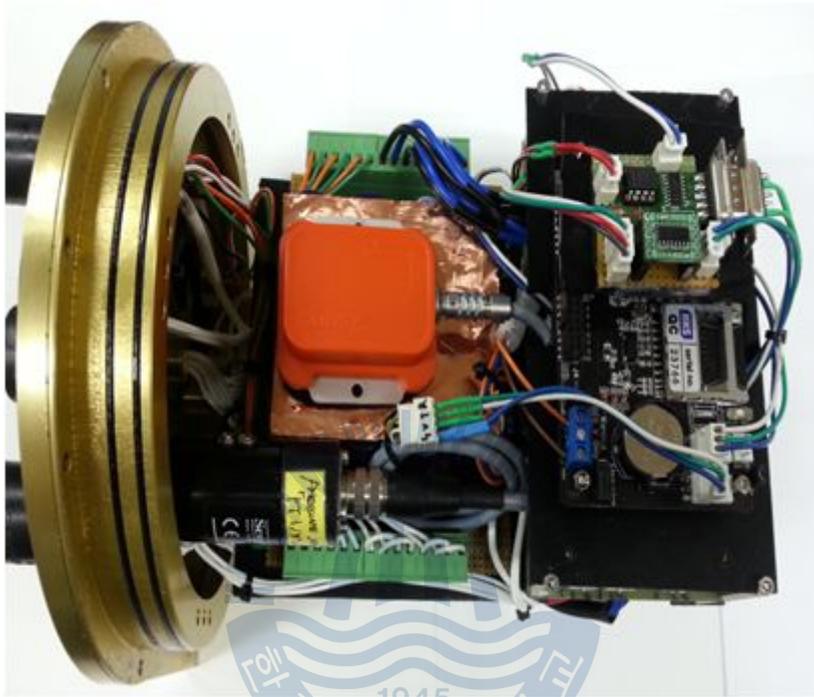


Fig. 3.9 The control housing

Fig. 3.9 는 제어하우징의 실제 내부 사진으로 적층구조로의 배치를 선택하여 임베디드 PC와 thruster control board, navigation board를 배치하여 제어 하우징을 소형화 하였다.

Table 3.3 specification of control housing

Division	ROV and AUV
Volume	230mm x 250mm
Weight	8Kgf
Control module	control board navigation board middle of the control board

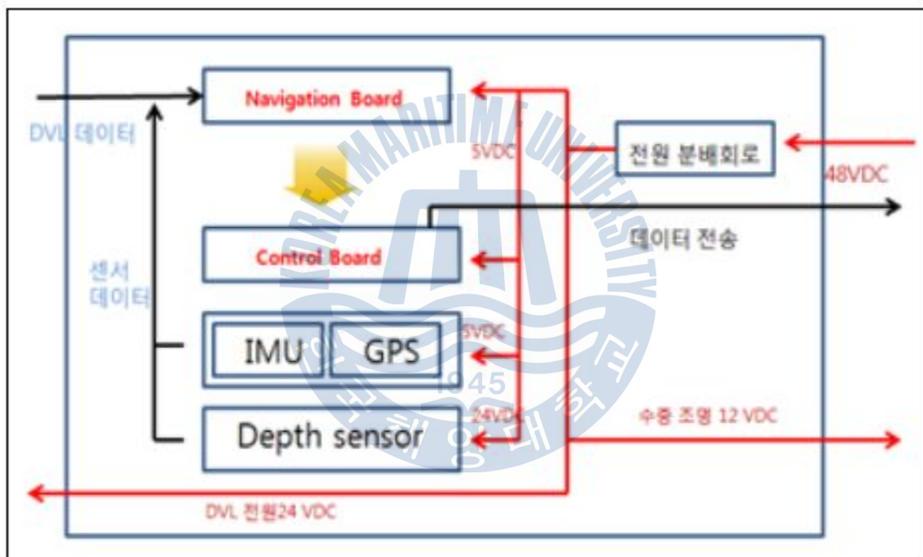


Fig 3.10 diagram of the control housing

제어 하우징은 sensor board 와의 통신 레벨을 맞추기 위해 control board 로 전송되는 navigation data를 TTL 레벨의 통신으로 변환 후 다시 3.3V 레벨의 통신으로 변환하였다. 또한 control board에서 추진체의 제어를 위해 각 추진체에 할당된 아이디를 통신으로 보내 주어야 할 필요가 있다. 추진체와 control board 보드 간의 통신은 RS485 통신을 사용하였다. RS485통신은 짧은 거리에서의 통신데이터 전송의 error를 감소시킬 수 있으며 control board 의 설계 시 회로의 간소화를 도모할 수 있어 RS-485통신을 채택 하였다.[14]

3.3.3 센서 시스템의 구성

센서 시스템은 선체의 현 상태, 경로, 위치등의 데이터를 정확하게 처리 하여 수중동작에 매우 중요한 부분이다. 정확한 위치 값과 경로 등을 파악하기 위해서 Fig 3.12 과 같이 여러 가지 센서로 구성된 센서신호 처리시스템을 구성하였고 Fig 3.19는 제작한 센서퓨전 신호처리시스템 보드이다. 센서의 퓨전을 위해 확장 칼만 필터의 알고리즘을 사용하였다.

항법 보드는 크게 3가지 파트로 구성 되어 있다. IMU, GPS, DVL, Depth Sensor의 각 정보를 수신하는 전용 마이크로 프로세서는 Atmega 8로 각각 구성 하였다. IMU, GPS, DVL과 Depth sensor의 출력신호를 SCI 통신을 통해 각각의 프로세서로 전송하였다. 개별 프로세서를 사용한 것은 각각의 센서들의 데이터 출력 주기가 달라서 통신을 원활히 하기 위한 구성이다. 이러한 개별 프로세서들의 센서 데이터 정보를 받아 정보를 모으는 마스터 프로세서로는 Atmega 8을 사용하였으며 각 정보의 업데이트 시, SPI통신을 이용하여 각 센서의 출력을 전송 받은 뒤 통합된 센서 정보를 DSP28335로 전송하게 된다. 항법보드의 구성은 각 센서의 데이터를 수신 받는 slave Atmega 8과 각 정보의 업데이트 시간과 출력 전체를 입력 받는 Master Atmega 8, 센서의 출력을 받아 kalman filter을 이용하여 위치 값을 추정해내는 네비게이션 컨트롤러 DSP28335로 구성되어있다.[15][16]



DVL

- Transducer Assemble Diameter: 12.6cm
- Housing Diameter: 12.6cm
- Overall Length: 17cm
- Weight in Air: 2.9kg
- Weight in water: 1.2kg
- Output
 - 3-axis velocity



GPS

- Output
 - latitude, longitude, altitude, time



USBL

- Dimension: 24cm x 6.4cm
- Weight in water: 0.65kg
- Weight out of water 1.45kg



IMU

- Output
 - 3D orientation(360°)
 - 3D acceleration
 - 3D rate of turn
 - 3D magnetic filed



Depth sensor

- Output
 - 0~5V
- Specifications
 - accuracy : ±0.15%
- Interfacing
 - Operating voltage : 11V~28V
 - Power consumption : 0.5W

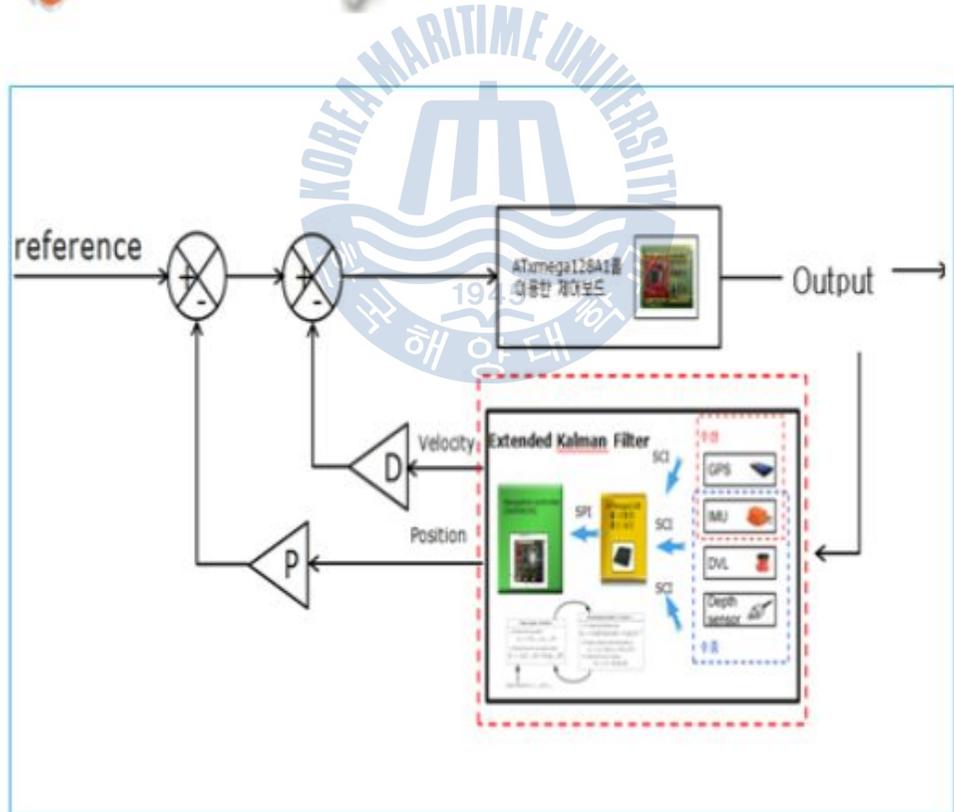


Fig 3.11 The sensor control system

(1) GPS(Global Positioning System)

GPS란 Global Positioning System의 약자이며, 미국에서 현재위치 및 자동차, 선박, 항공기 등의 항법 장치 사용을 목적으로 쏘아 올린 인공위성을 이용하여, 현재 위치를 계산할 수 있는 시스템이다. 대역에 따라 L1, L2로 나누어지며, 일반적으로 사용 가능한 대역은 L1 대역이며 위치 오차가 10~20미터 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 3.12 GPS and Antenna

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

Table 3.4 GPS(Global Positioning System) 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 ± 5%
		Power consumption	<1W

(2) DVL (doppler velocity log)

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

도플러 센서의 세부 사양은 아래 도표에 나타난다. 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.[17]



Fig 3.13 DVL (doppler velocity log)

Table 3.5 DVL (doppler velocity log) specification

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

(3) IMU (inertial measurement unit)

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 센서 이다.

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



Fig. 3.14 IMU (inertial measurement unit)

Table 3.6 IMU (inertial measurement unit) specification

IMU	Output	3D orientation	
		3D acceleration	
		3D rate of turn	
		3D magnetic field	
	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 휘스톤 브리지 회로로 구성된 4개의 피에조저항은 정전류로 구동하며, 압력을 받으면 출력단에 압력에 비례한 정압신호를 얻을 수 있고, 온도보상회로를 함께 내장하여 정도를 일정 하게 유지시킨다.



Fig 3.15 depth sensor

Table 3.6 depth sensor specification

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

수중에서는 GPS의 데이터를 받을 수가 없어서 관성 센서인 IMU에 보조 항법 센서로, GPS, 와 DVL의 외부 계측 신호를 이용하여 복합 항법 시스템을 구성하였다.

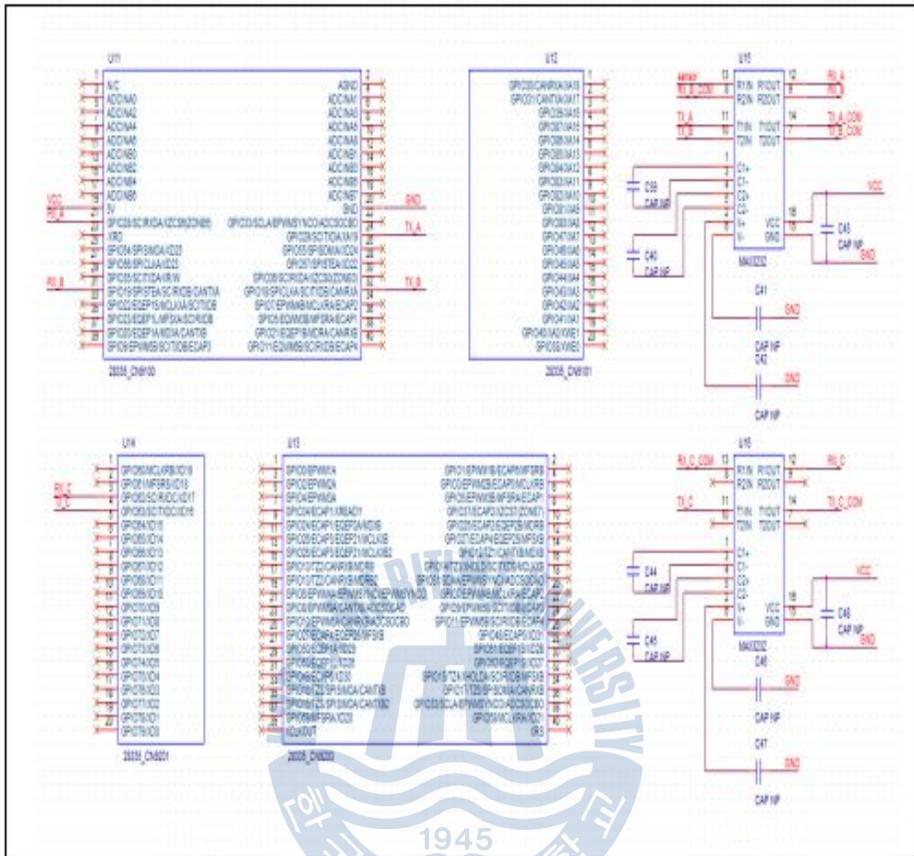


Fig 3.16 navigation controller(DSP 28335)

Fig 3.16 은 navigation controller 보드의 회로도 이다. 전체 센서의 출력과 입력 시간을 받아 HAUV의 위치 좌표를 연산해 낸다. AUV의 센서의 경우 GPS를 제외한 다른 센서는 body를 기준으로 센서의 출력이 나오기 때문에 좌표 변환과 Extended Kalman filter를 이용하여 센서에서 발생하는 노이즈를 제거 하였다.

Fig. 3.17은 Atmega8의 회로도 이다. 각 센서의 값을 저장하고 있는 slave Atmega 8과의 SPI 통신을 통해 데이터의 업데이트 시간을 계산하고 데이터를 통합하고 있다. 각 센서의 값을 입력받는 slave Atmega8의 회로도로 각 센서의 값을 입력 받은 뒤 업데이트 된 정보를 마스터 프로세서로 전송한다.

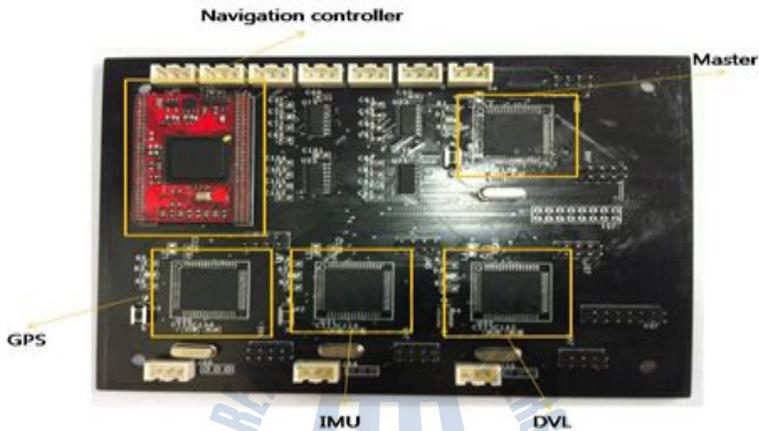


Fig 3.18 navigation board

Fig 3.18는 navigation board의 실제 사진이며 제어 하우징에 적층 되어 센서의 데이터를 받아 연산하여 실제 좌표의 데이터를 처리하는 기능을 담당하고 있다.

4 수중 항법 알고리즘 연구

4.1 수중 항법 알고리즘 연구

무인잠수정의 초기의 자세를 구하기 위한 초기계략정렬과 수중 항법시스템에서의 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 4.1과 같이 정의한다.[18]

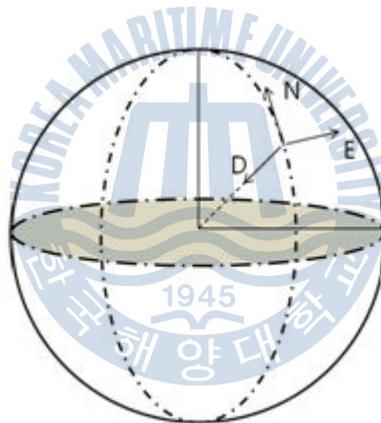


Fig 4.1 navigation coordinate

동체 좌표계(Body coordinate)는 무인잠수정의 질량 중심을 기준으로 하는 좌표계로 Fig 4.2의 무인잠수정을 기준으로 하여 무인잠수정의 x-축을 롤(roll, Φ), y-축을 피치(pitch, θ), z-축을 요(yaw, ψ)로 정의한다.

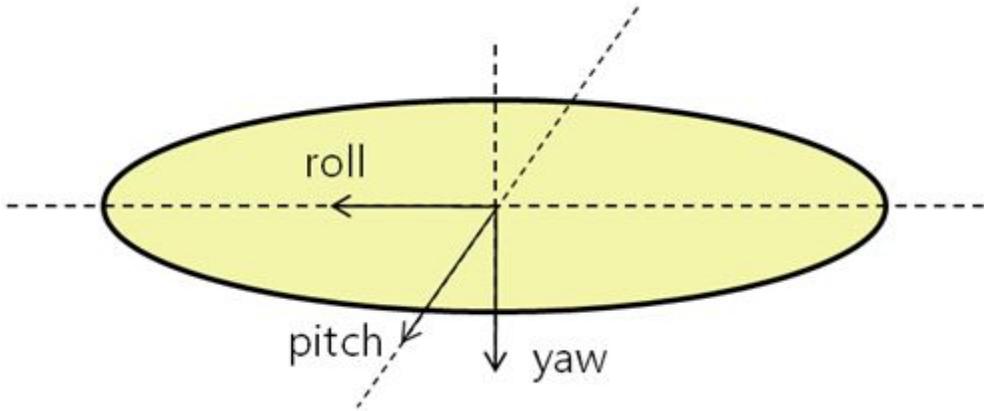


Fig. 4.2 body coordinate

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. [19]

항법 좌표계로 정의된 벡터와 동체 좌표계로 정의된 벡터라면, 이들 간의 관계는 식(4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}^b = C_n^b \mathbf{r}^n \quad (4.1)$$

자세 변환 행렬은 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 식(4.2)와 같다.

$$C_n^b = C_3^b(\phi)C_2^3(\theta)C_n^2(\psi) = \begin{pmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & c_\theta s_\phi \\ c_\phi c_\psi s_\theta + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - c_\psi s_\phi & c_\theta c_\phi \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

여기서, 기본 동차 변환 행렬은 다음과 같다.

$$C_3^b(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}, C_2^c(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}, C_n^c(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

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(4.4)와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -gs_\phi \\ gc_\phi s_\theta \\ gc_\phi c_\theta \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

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(4.5)과 같이 구할 수 있다.

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

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (4.5)$$

식(4.4)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.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

항법 좌표계의 지구의 지자기 벡터 x축을 m_1 , y축을 m_2 , z축을 m_3 로하고 동체 좌표계의 지자기 센서 출력 x축을 m_x , y축을 m_y , z축을 m_z 로 정의하면 항법 좌표계의 지자기 벡터에 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 변환 행렬을 곱하면 식(4.6)과 같이 가정 할 수 있다.

yaw값을 구하기 위한 계산상의 편의를 위해, C_n^b 를 yaw에 관한 행렬, roll, pitch에 관한 행렬로 나누면 식(4.7)과 같다.

$$C_1 = \begin{pmatrix} c_\theta & 0 & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta & c_\phi & s_\phi c_\theta \\ c_\phi s_\theta & -s_\phi & c_\phi c_\theta \end{pmatrix}, C_2 = \begin{pmatrix} c_\psi & s_\psi & 0 \\ -s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$C_n^b = C_1 C_2$ 이므로, 식(4.8)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_1 C_2 \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

따라서 다음의 결과를 구할 수 있다.

$$t_3 = \frac{s_\psi}{c_\psi} = \frac{-m_2 X + m_1 Y}{-m_1 X - m_2 Y} = \tan(\psi) \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{-m_2 X + m_1 Y}{-m_1 X - m_2 Y}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{-m_2(c_\theta m_x + s_\theta s_\phi m_y + c_\phi s_\theta m_z) + m_1(c_\phi m_y - s_\phi m_z)}{-m_1(c_\theta m_x + s_\theta s_\phi m_y + c_\phi s_\theta m_z) - m_2(c_\phi m_y - s_\phi m_z)}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{-m_2 c_\theta m_x - m_2 s_\theta s_\phi m_y - m_2 c_\phi s_\theta m_z + m_1 c_\phi m_y - m_1 s_\phi m_z}{-m_1 c_\theta m_x - m_1 s_\theta s_\phi m_y - m_1 c_\phi s_\theta m_z - m_2 c_\phi m_y + m_2 s_\phi m_z}\right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

roll, pitch 초기 정렬을 실행을 하면 식(4.10)의 우변의 항은 상수 값이 되므로 yaw의 값을 구할 수 있게 된다.



4.2 The extended kalman filter (EKF)

Kalman filter는 선형 시스템을 대상으로 개발된 알고리즘으로 비선형 시스템에는 적합하지 않다. AUV는 비선형 시스템이기 때문에 본 연구에서는 비선형 시스템에 적용 가능한 확장 칼만 필터를 적용하였다.[20][21]

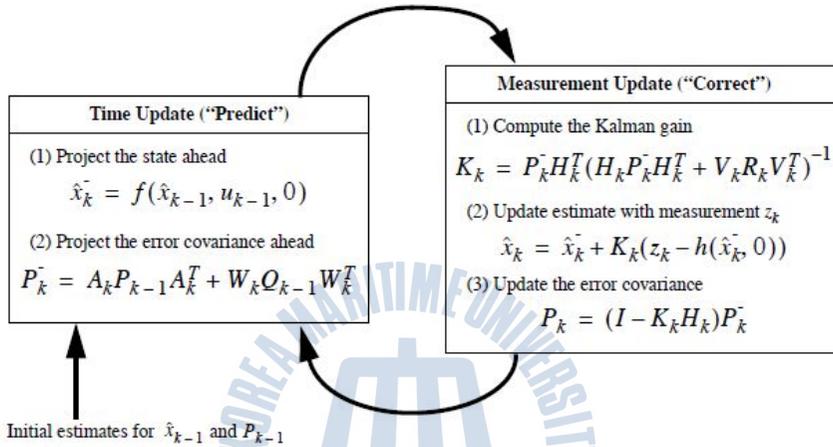


Fig 4.3 The operation of the extended kalman filter

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

5 HAUV의 호버링 및 항법시스템 의 성능 시험

5.1 호버링 제어 알고리즘 및 성능 시험

depth control 과 surge motion performance를 위해 depth 센서와 IMU를 사용하여 Fig 5.1과 같이 궤환 제어 시스템을 구성하였다. [22][23]

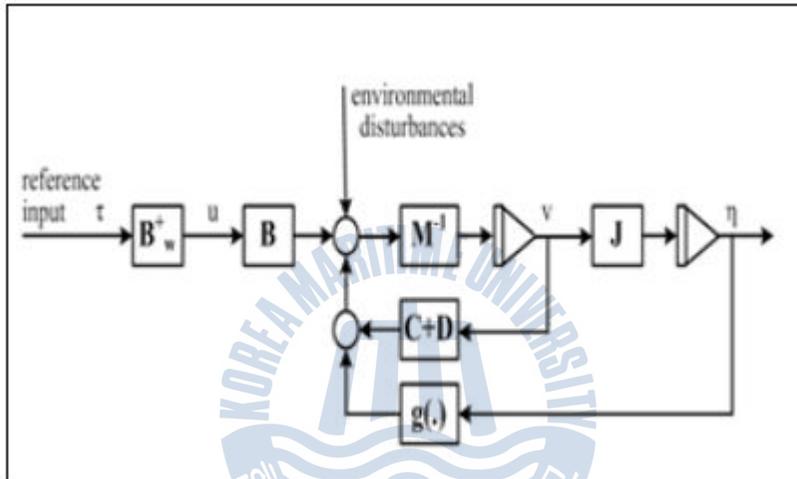


Fig 5.1 The fusion control system of tilt and depth

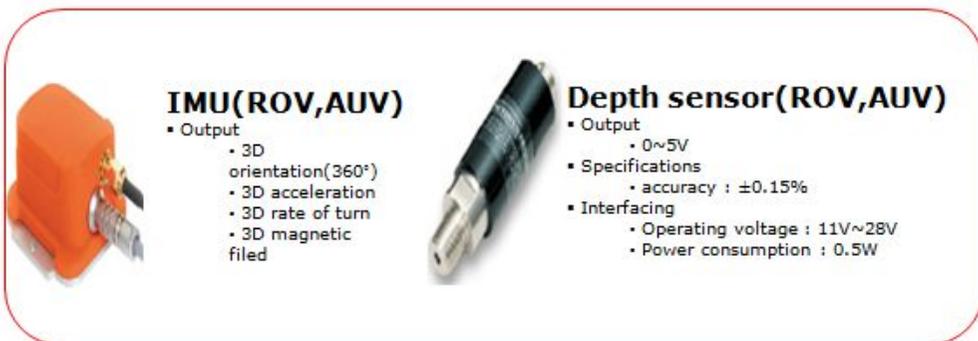


Fig 5.2 sensors used to control of hovering

HAUV의 심도 제어 성능시험을 위해 PID제어기를 사용하여 수심제어 및 pitch, roll을 제어 하였다.

HAUV의 심도 제어 성능시험을 위해 PID제어기의 이득을 $K_p = 4.0$, $K_i = 0.2$, $K_d = 0.4$ 로 적용하여 1m의 수심제어를 하였다. 실험 중에 약 600개의 데이터를 샘플링 타임 0.3초 간격으로 저장하여 Fig 5.3에 나타내었다.[24][25]

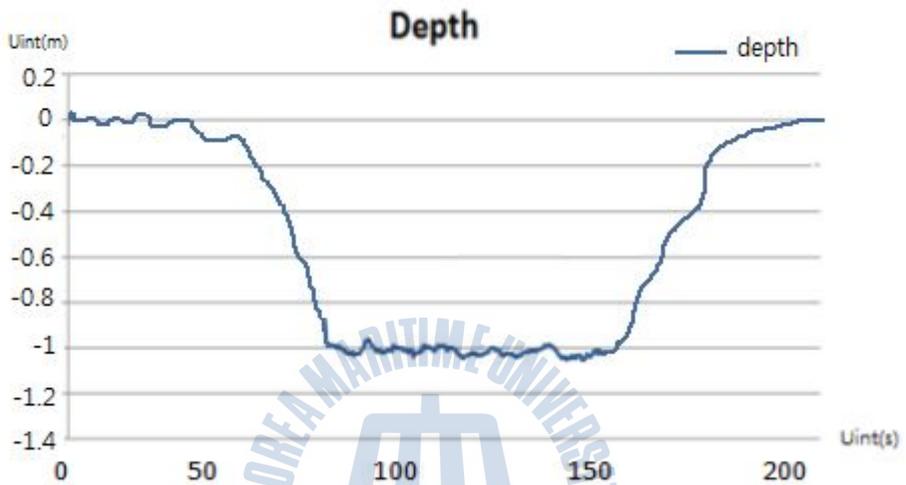


Fig. 5.3 The results of the HAUV depth

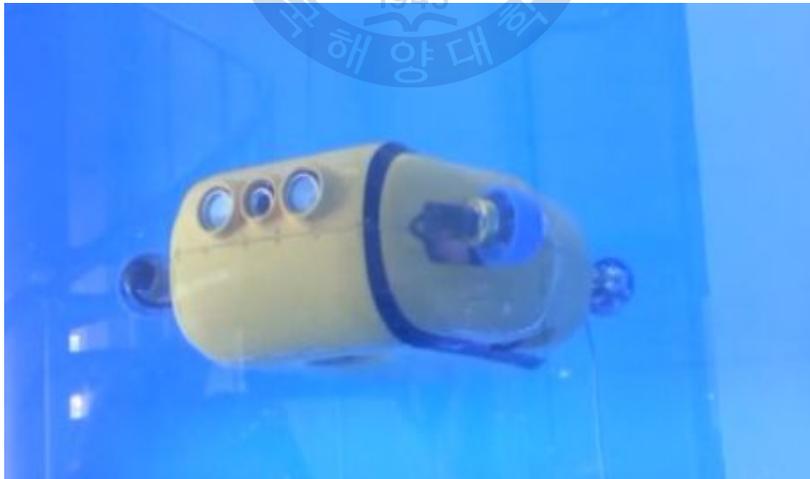


Fig. 5.4 The actual depth test photo(in the water pool)

또한, HAUV의 속도성능을 시험하였고 심도제어 실험과 같이 동일한 PID이득을 적용하였다. 실험 중에 DVL센서를 통해 데이터 약 1700개의 데이터를 샘플링 타임 0.015 초 간격으로 저장하여 40m 거리를 통과 하는 속력을 계산하여 Fig. 5.5에 나타내었다. HAUV의 속력은 항법 시스템의 필수 데이터로 호버링 테스트 와 함께 진행하였다.[26]

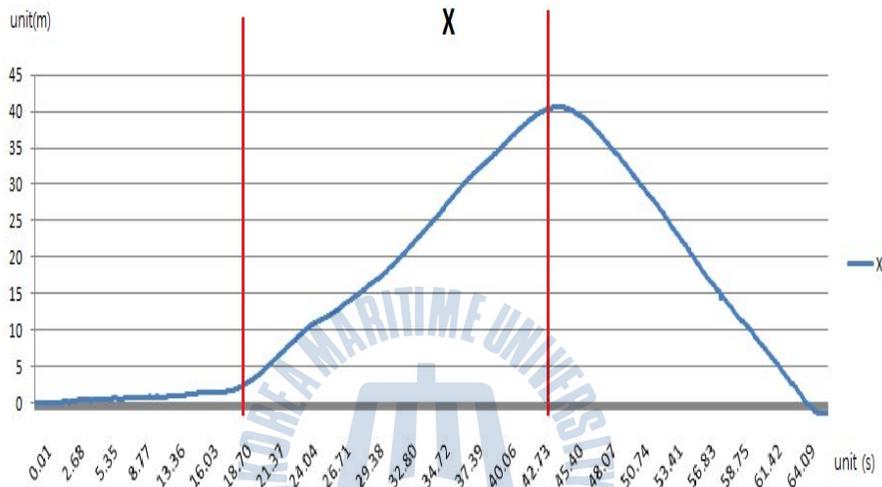


Fig 5.5 The speed test results of HAUV

HAUV의 심도 자세제어 성능시험을 위해 PID제어기의 이득을 $K_p=3.4$, $K_i=0.3$, $K_d=0.4$ 로 적용하여 Roll, 과 Pitch의 각을 30도로 제어하여 자세를 제어 하였으며, 두각을 동시에 제어 해 보았다. Fig. 5.6의 데이터는 지자계 센서(IMU)를 사용하여 Pitch축을 제어하여 0.1초 의 샘플링 타임으로 약 1200개의 데이터를 분석하려 그래프로 나타내었고 Roll축 또한 같은 샘플링 주기를 사용하여 약 1400개의 데이터를 분석하여 Fig. 5.8에 나타내었다.

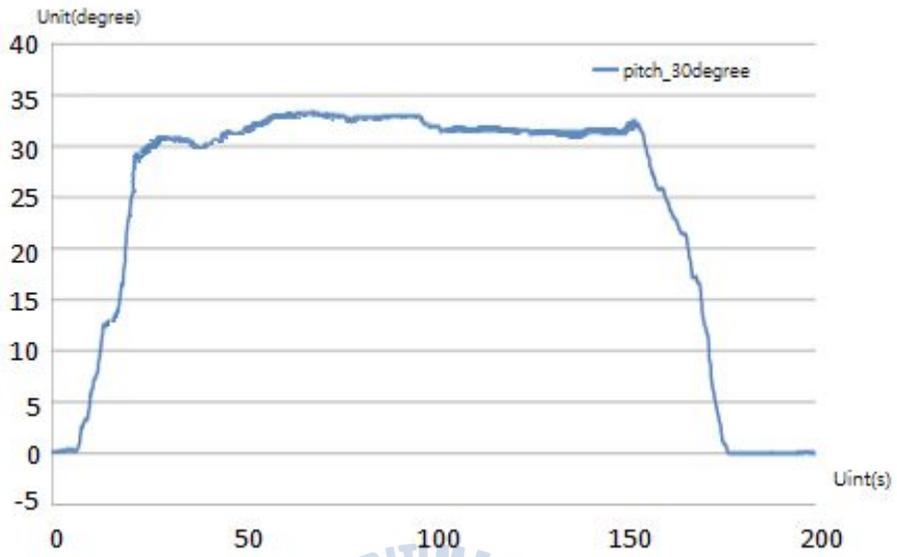


Fig 5.6 The 30 ° pitch control of HAUV



Fig 5.7 The actual 30 ° pitch control test photo(in water pool)

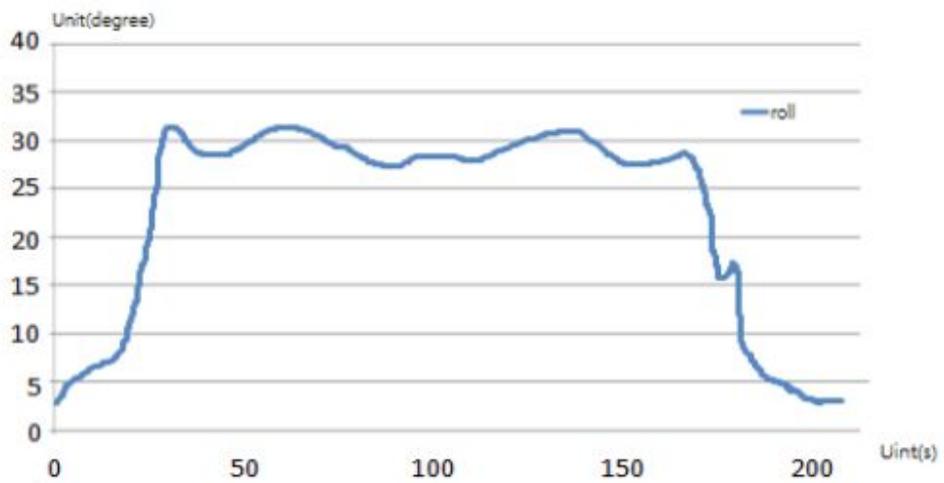


Fig 5.8 The 30 ° roll control of HAUV



Fig 5.9 The actual 30 ° roll control test photo(in water pool)

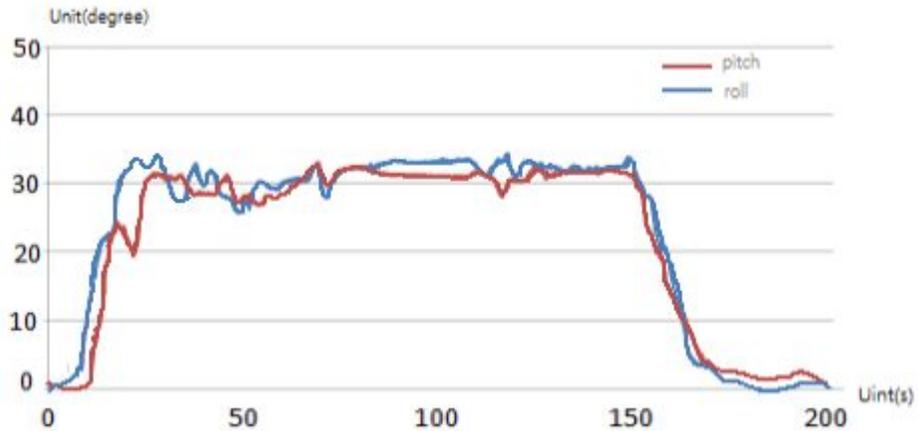


Fig 5.10 The 30 ° roll and picth control of HAUV

roll축과 picth축을 동시에 제어하기 위해 동일한 샘플링 타임(0.1초)의 roll축과 picth축 데이터를 동시에 약 1400의 데이터를 받아 30도의 각도를 제어하여 Fig 5.8 에 나타내었다.

각각의 roll축과 picth축의 제어에서 지정된 각도로의 이동시 HAUV 흔들림 현상이 발견되었지만 자세의 고정 부분에서는 안정적인 데이터를 확보할 수 있었다. 그러나 두 축을 동시에 제어할 때는 roll축의 초반 구동시 약간의 흔들림을 나타내었지만, 곧 안정을 되찾았다.

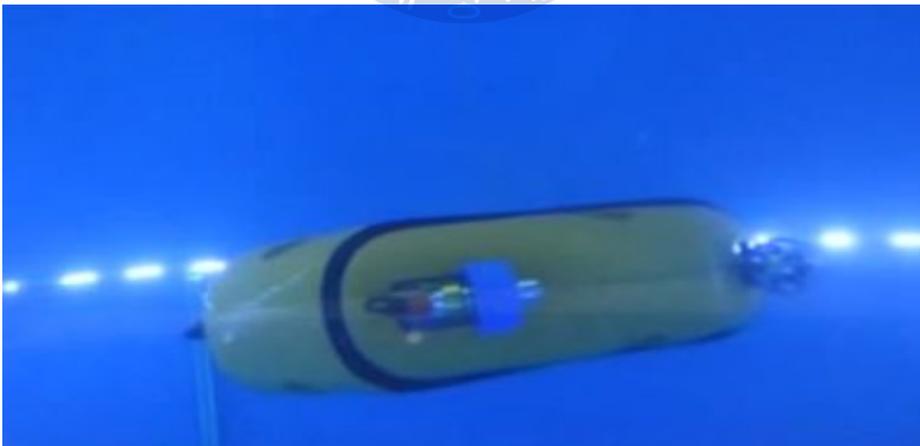


Fig 5.11 The actual 30 ° roll and picth control test photo(in water pool)

5.2 HAUV의 수중 항법 알고리즘 및 성능 시험

항법 시스템은 수중에서 HAUV가 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.

HAUV 항법시스템에서 항법센서는 GPS, DVL, IMU, Depth sensor를 이용한 센서 융합을 통하여 HAUV의 위치및 자세를 찾아내고 센서 항법의 차원으로 구분하며 수상항법과 수중항법으로 구분되며 여기에 따르는 센서 시스템의 구성이 서로 약간 다르다. 본 연구에서 구성한 항법 시스템은 다음과 같다.

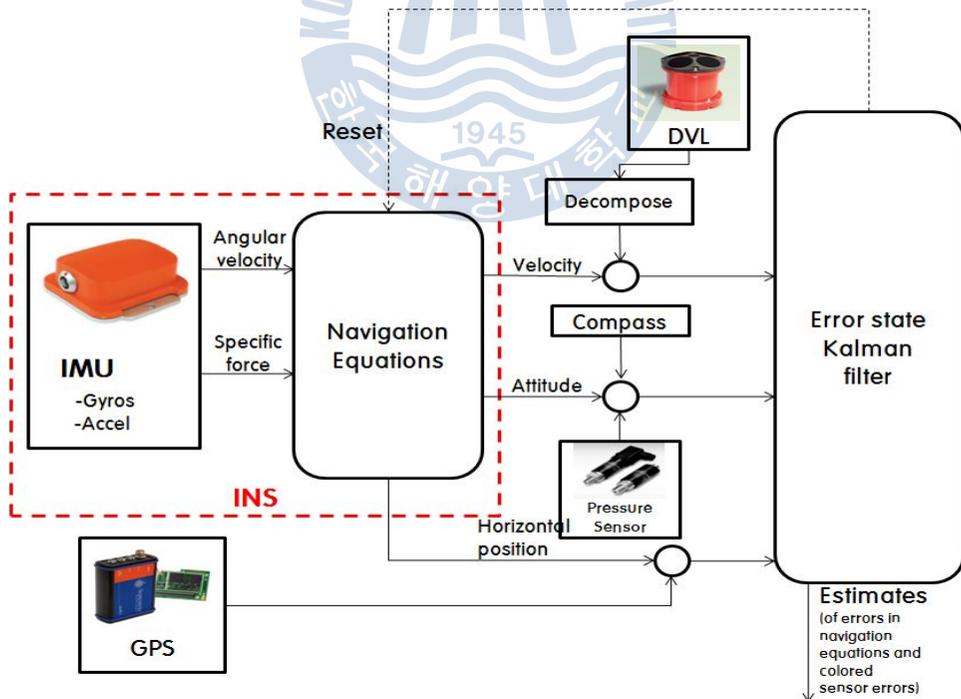


Fig 5.12 navigation system

수상에서는 GPS 신호를 받을 수 있어서 근본적으로 이 신호를 근간으로 AUV의 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. DVL 센서의 경우 센서의 노이즈로 인하여 적분과정을 통하여 위치를 구하는 과정에서 위치 오차가 증가하게 된다. 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 5.12 과 같이 구성하였다.

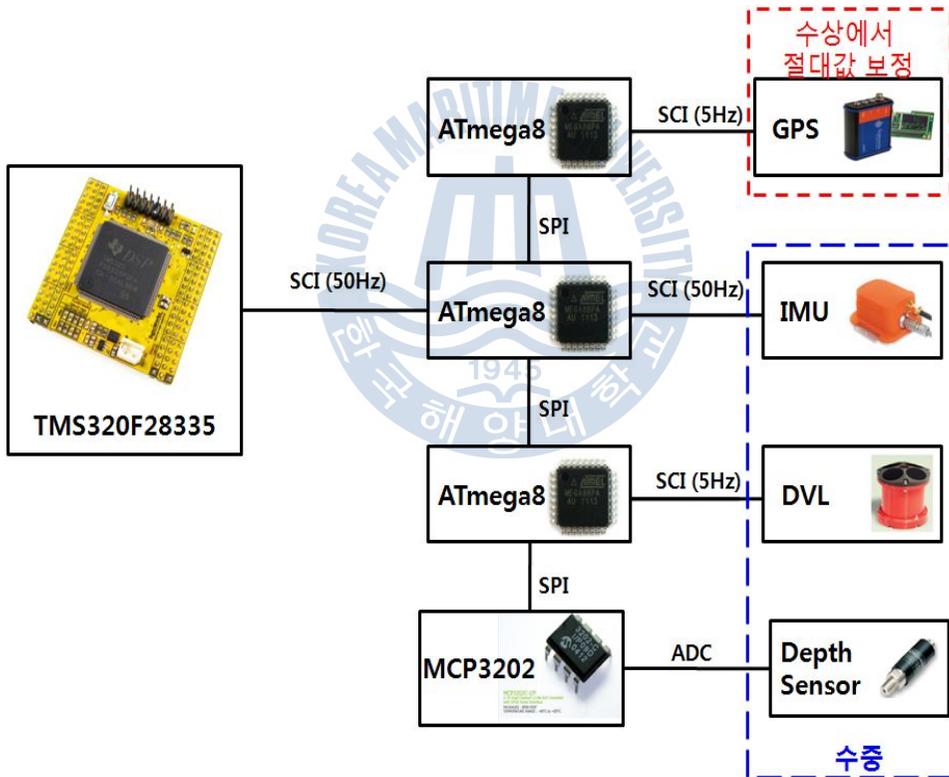


Fig 5.13 H/W composition of navigation system at surface

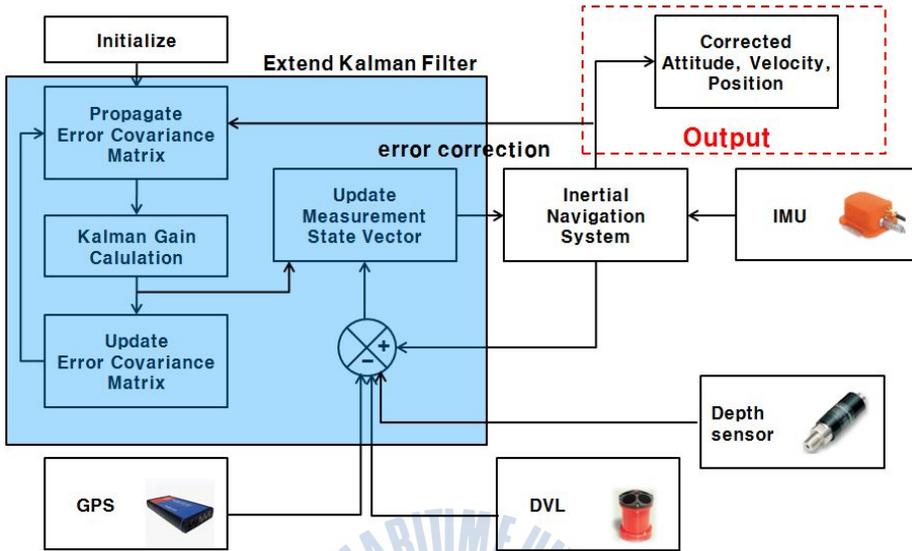


Fig 5.14 S/W composition of navigation system at surface

HAUV는 IMU, DVL, depth sensor를 이용한 항법 시스템을 기본으로 AUV가 수면에 부상하였을 때 GPS를 이용하여 위치정보를 보정하는 시스템으로 Fig 5.14과 같이 구성하였다.

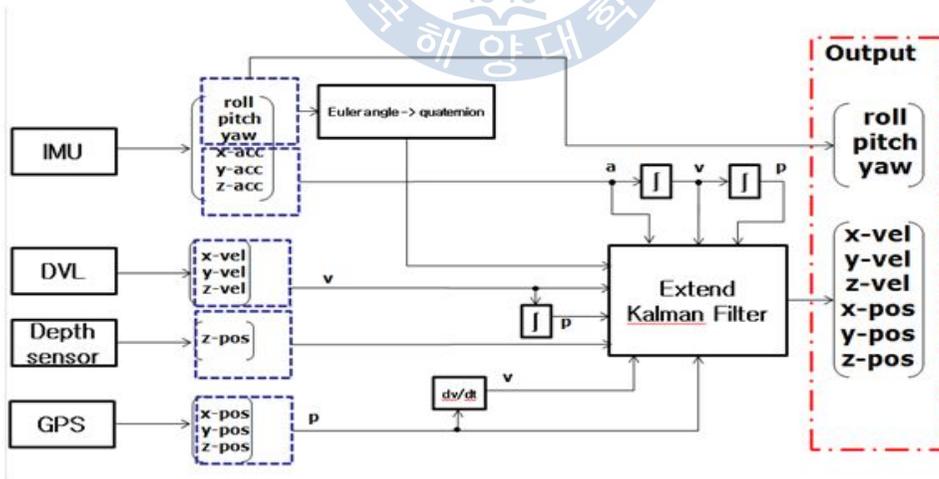


Fig 5.15 HAUV navigation system

수중에서의 항법시스템은 GPS의 신호를 받지 못하게 되어 GPS를 대신 하여 위치 정보를 얻기 위하여 DVL, Depth Sensor, IMU를 이용하여 센서 퓨전을 통

하여 HAUV의 위치를 추정해 낸다.

수중에서의 항법 시스템은 DVL에서 나오는 HAUV의 속도 정보를 이용하여 위치를 추정해 낸다. DVL 경우 Table. 3.4에서 보는 바와 같이 maximum ping rate 가 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.

HAUV는 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. HAUV의 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 Measurement matrix와 최종 출력인 Estimate matrix, 시스템 모델 F matrix, H matrix로 구성되며 예측 과정과 추정 과정으로 나누어진다.

예측 과정에서는 이전 Estimate matrix와 오차 공분산을 입력으로 받아서 현재 상태의 Estimate matrix와 오차 공분산을 구하게 된다. 예측 과정에서 사용하는 Estimate matrix와 시스템 모델 F matrix의 구성은 식(5.1)과 식(5.2)와 같다.

식(5.1)의 Estimate matrix는 4개의 쿼터니언 원소와 3축 속도 값으로 구성된다.

$$x = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ v_x \ v_y \ v_z]^T \quad (5.1)$$

식(5.2)의 F matrix는 이전 상태의 Estimate matrix를 현 상태의 Estimate matrix로 연결 시켜주는 matrix로 구성된다.

$$F = \begin{pmatrix} I_{4 \times 4} & O_{4 \times 3} & O_{4 \times 3} \\ O_{3 \times 4} & I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 4} \ dt \cdot I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

추정 과정에서는 예측 과정에서의 Estimate matrix와 오차 공분산, Measurement matrix를 입력으로 받아 시스템 모델 H matrix를 이용하여 최종 Estimate matrix와 오차 공분산을 구하게 된다. 추정과정에서 사용하는 Measurement matrix와 H matrix 구성은 식(5.3)과 식(5.4)와 같다. 식(5.3)의 Measurement matrix는 IMU센서의 자세값과, DVL의 3축 속도 출력 값으로 구성된다.

$$z = (q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ v_x \ v_y \ v_z) \quad (5.3)$$

식(5.4)의 H matrix는 Estimate matrix를 Measurement matrix로 연결 시켜주는 matrix로 구성된다.

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_1}{\partial y} & \frac{\partial h_1}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial x} & \frac{\partial h_2}{\partial y} & \frac{\partial h_2}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial x} & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \frac{\partial h_3}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

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

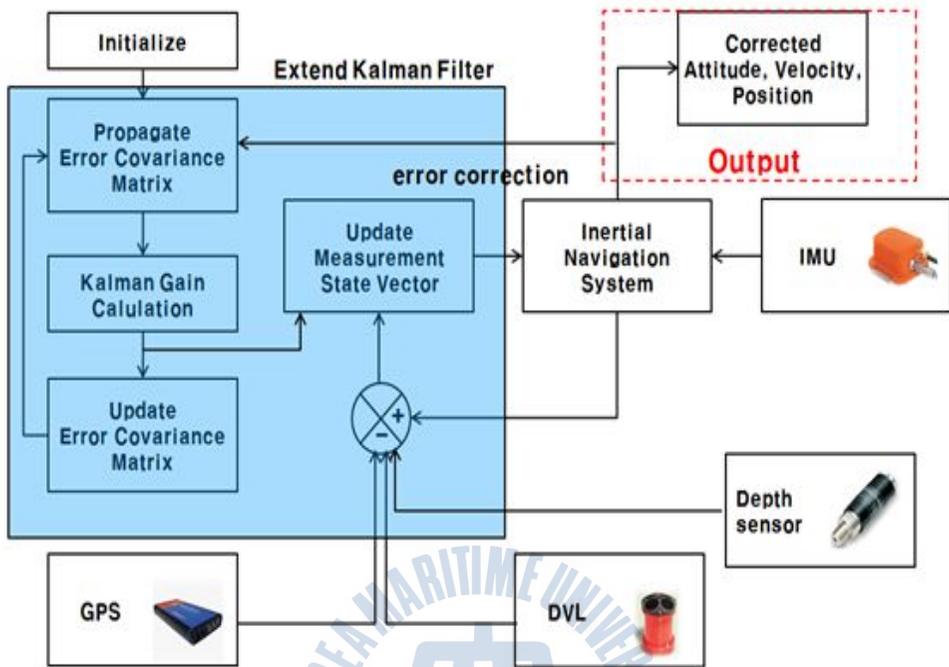


Fig 5.16 S/W composition of navigation system at underwater

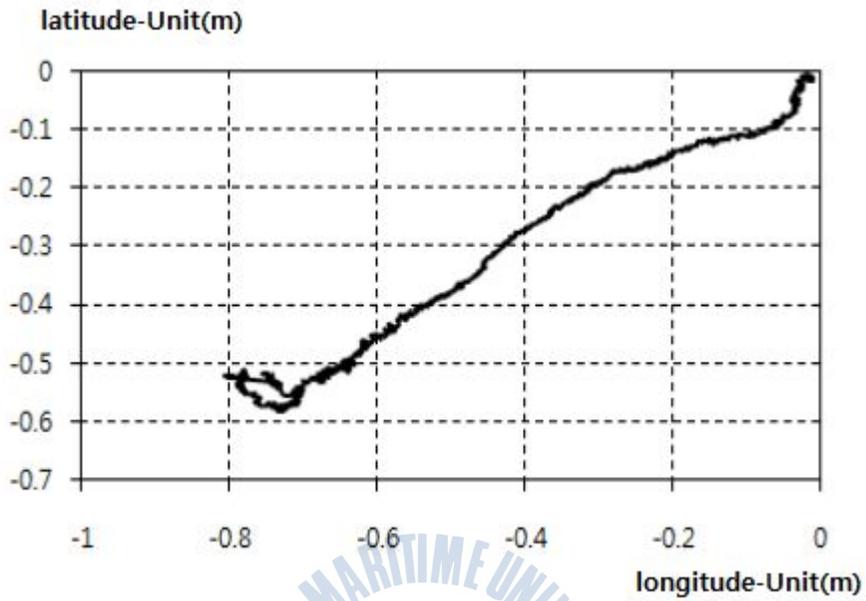


Fig 5.17 experiment at stop of HAUV

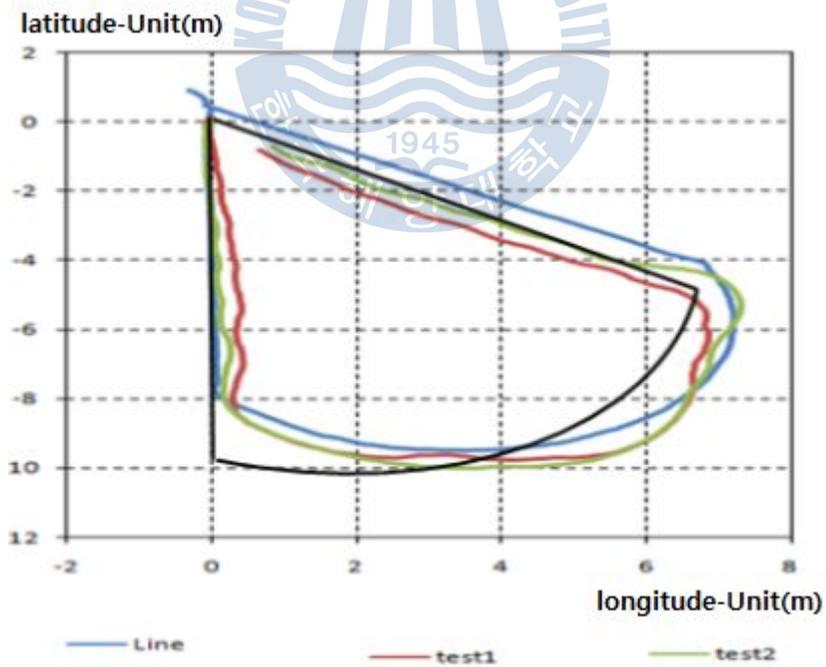


Fig 5.18 way point test using the GPS, IMU

항법 테스트 결과는 HAUV의 테스트 중인 관계로 수조에서 정지상태에서 17분간 위치정보를 구한 그래프와 육상 테스트 데이터만 검증하였다.

Fig 5.17은 HAUV를 고정 해놓은 상태에서 정지 상태로 17분간 테스트 한 결과 x방향으로 최고 0.8m y축 방향으로 0.6m 움직임을 확인하였다. [26]

Fig 5.18 은 GPS와 IMU 센서를 이용하여 육상에서 그려놓은 트랙을 따라 움직였을 때의 위치 정보 이다.

검은색 line은 육상에서의 HAUV가 지나 갈 궤적을 지상에 나타낸 line 이며, Line은 육상에 그려놓은 트랙을 따라 HAUV를 정확히 움직였을 때의 위치 정보 이고, 이 정보를 웨이 포인트로 HAUV에 입력 후 목표지점 반경 1m내에 도달하면 목표로 설정했을 때의 HAUV의 추진체 속도를 변화시킨 위치 정보는 test1,2 이다.



6 결론

수중의 작업 목적에 따라 ROV와 AUV의 두 가지 용도로 사용할 수 있는 새로운 수중로봇의 설계연구를 하였다. 이중에서 호버링 가능한 HAUV 구조에 대한 모듈형 설계연구를 수행하였고 HAUV의 제어시스템을 설계 및 제작하였다. 정확한 위치 및 속도를 추정할 수 있도록 다양한 센서신호를 퓨전하여 처리하는 센서퓨전보드를 제작하고 확장 칼만 필터를 포함하는 전체 제어시스템을 설계하였다.

제작한 HAUV의 추진성능 시험과 호버링 제어를 위해 기본적인 또한 개발된 수중 항법시스템의 waypoint test를 좀 더 진행하여 수중 고 정밀 위치제어를 위한 실험을 더 진행 할 예정이다.

- 1) 수중 호버링 제어를 통해 수중에서의 HAUV의 자세가 제어됨을 확인 하였으며 , Roll, Pitch의 제어가 실시간으로 제어됨을 확인하였다.
- 2) 수중 항법 을 위한 H/W 센서 구성과 S/W 알고리즘 구성을 HAUV에 용하여 육상과 수조에서 경로 추적 시험을 통해 성능을 검증하였다.
- 3) 실내 수조에서의 정지 상태로 15분간 성능 시험 결과 X방향으로 최고 0.8m y축 방향으로 0.6m의 위치 오차가 있었으나 오차가 발산하지 않음을 확인하였다.
- 4) 심도제어 실험을 하였고 실험결과 30°도 피칭의 제어는 평균 1.2°의 오차 범위 내의 제어 성능을 나타내었다. 또한 30° 롤링 제어는 평균 1.5°의 오차 범위 내의 제어 성능을 나타내었으며, 1M 심도 제어의 평균 오차 범위는 5.3cm로 성공적으로 됨을 확인하였다. 이를 통해 개발한 HAUV의 성공적인 호버링 제어가 됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이종식, 이판목, 이종무, 홍석원. "300m급. 수.중 ROV 개발에 관한 연구." 한국해양공학회, 제.8권 제.1호. pp. 50-61,1994.
- [2] Milne, P. H.(1983), Underwater acoustic positioning systems, Gulf Publishing Company.
- [3] 유선철, "Introduction to specific purpose AUV and applications", 한국정밀공학회, vol. 26, no.5, pp. 33-40, 2009.
- [4] 모장오, 남구만, 강신정, 임효남, 이영호 (2002). "상용코드를 이용한 원심 펌프 임펠러 성능해석에 관한연구", 2002년 추계 동력기계학회발표논문.
- [5] 이창섭, 서정천, 현범수, 김문찬, 서성부, 문일성 (2007). 선박추진과 프로펠러설계, 문운당, pp 225-268.
- [6] 최현택, 김기훈, 이판목, 이종무, 전봉환, "Introduction to ROV and motion control & signal processing for ROV hemire", 한국정밀공학회, vol. 26, no.26, pp. 41-47, 2009.
- [7] 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.
- [8] 최현택, 김기훈, 이판목, 이종무, 전봉환. "ROV(원격조종수중로봇)의 소개와 ROV 해미래의 운동제어 및 신호처리", 한국정밀공학회, 제25권, 제5호, pp. 41-47, 2009.
- [9] Alberto Leon-Garcia, Probability and Random Process for Electrical.
- [10] <http://www.tecnadyne.com/>
- [11] Y. S. Choi, "Underwater robot technology for inspection", Underwater Robot a Research Body Workshop, pp. 23-27, 2006.
- [12] Branko Ristic et al, Beyond the Kalman Filter, ARTECH House, 2004
- [13] 최현택, 김기훈, 이판목, 이종무, 전봉환, "Introduction to ROV and motion control & signal processing for ROV hemire", 한국정밀공학회, vol. 26, no.26, pp. 41-47, 2009.
- [14] S. M. Ong, A Mission Planning Expert System with Three-Dimensional Path Optimization for the NPS Model 2 Autonomous Underwater

- Vehicle Master Thesis, Naval Postgraduate School, 1990.
- [15] 이판욱 외, “초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템”, 한국해양공학회 2004, vol. 18, pp. 33~39.
- [16] J. R. Hendershot Jr and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Magna Physics Publishing, 1994.
- [17] 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.
- [18] An Introduction to the Kalman Filter, Greg Welch and Gary Bishop
- [19] Strapdown Inertial Navigation Technology, Second Edition
- [20] 오수훈, 김태식, “"칼만필터를 이용한 무인기의 표적 위치 추정 정확도 개선"” 한국항공우주연구원, 항공우주기술, 제6권, 제1호, pp. 237-244, 2007.
- [21] Lewis, F.L., Optimal Estimation, John Wiley & Sons, 1986.
- [22] Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Process, Mc-Graw Hill.
- [23] Maybeck, Peter S. Stochastic Models, Estimation, and Control, Vol.1
- [24] Patrick Billingsley, Probability and Measure, Ed. Wiley, 1979.
- [25] 변승우 외, “"수중작업용 Hovering AUV의 Test-bed 설계."” 국방수중로봇 워크샵 2005.
- [26] Myring, D. F, 1976. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow, Aeronautical Quarterly, vol. 27, pp186-19.