



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

수중탐사용 Hovering AUV의 Test-bed 개발



濟州大學校 大學院

海洋情報시스템工學科

邊承優

2007년 2월

수중탐사용 Hovering AUV의 Test-bed 개발

指導教授 金俊榮

邊承優

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2007年 2月

邊承優의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 조 일 형

委 員 이 중 현

委 員 김 준 영



濟州大學校 大學院

2007年 2月

Development of a Hovering AUV Test-bed
for Underwater Explorations

Seung-Woo Byun

(Supervised by Professor Joon-Young Kim)

A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master
of Engineering

2007. 2

Department of Oceanic Information and System Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

SUMMARY

This paper describes the design and performance of a hovering AUV test-bed 'NOAH' constructed and analyses the dynamic performance of the underwater vehicle using simulation program MATLAB / SIMULINK and carry out depth control test at small basin. The main purpose of 'NOAH' is to carry out fundamental tests on its station keeping, attitude control, and position control. It can be a tool to evaluate the performance of a new control algorithm, operating software and the characteristics of sensors for the AUV. Its configuration is similar to the general ROV appearance for underwater explorations and its dimensions are 0.75m×0.5m×0.5m. It has 4 thrusters, two longitudinal thrusters that had 350watts and one lateral / vertical thruster that has 300watts propulsion. The vehicle is equipped with a pressure sensor for measuring water depth and a magnetic compass for measuring heading angle. The navigation of the vehicle is controlled by an small on-board Pentium III-class computer, which runs with the help of the Windows XP operating system. These give us an ideal environment for developing various algorithms needed for developing and advancing hovering AUV.

Notation

B	부력
I_x	x축에 대한 잠수정의 관성 모멘트
I_y	y축에 대한 잠수정의 관성 모멘트
I_z	z축에 대한 잠수정의 관성 모멘트
I_{xy}	xy축에 대한 관성적
I_{yz}	yz축에 대한 관성적
I_{zx}	xz축에 대한 관성적
K	x축 방향의 잠수정에 작용하는 모멘트(Roll moment)
K_{prop}	x축 방향 추진 모멘트
L	잠수정의 길이
m	잠수정의 질량
M	y축 방향의 잠수정에 작용하는 모멘트(Pitch moment)
M_{prop}	y축 방향 추진 모멘트
N	z축 방향의 잠수정에 작용하는 모멘트(Yaw moment)
N_{prop}	z축 방향 추진 모멘트
p	x축 방향 각속도(Roll)
q	y축 방향 각속도(Pitch)
r	z축 방향 각속도(Yaw)
u	x축 방향 선속도(Surge)
v	y축 방향 선속도(Sway)
w	z축 방향 선속도(Heave)
W	잠수정의 중량
X	잠수정의 x축에 작용하는 힘 벡터
X_{prop}	x축 방향 추진력
Y	잠수정의 y축에 작용하는 힘 벡터
Y_{prop}	y축 방향 추진력
Z	잠수정의 z축에 작용하는 힘 벡터
Z_{prop}	z축 방향 추진력
x_G	선체고정 좌표계의 X축 무게중심 위치벡터
y_G	선체고정 좌표계의 Y축 무게중심 위치벡터
z_G	선체고정 좌표계의 Z축 무게중심 위치벡터
ρ	물 밀도
θ	y축 방향 각변위(Pitch angle)
ϕ	x축 방향 각변위(Roll angle)
ψ	z축 방향 각변위(Yaw angle)

목 차

SUMMARY.....	i
Notation.....	ii
목 차	iii
List of Figures.....	v
List of Tables	vii
1. 서 론.....	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 연구동향.....	2
1.3 연구내용.....	4
2. NOAH의 개발.....	5
2.1 설계목표.....	5
2.2 하드웨어 제작.....	7
2.2.1 선형 (Hull shape).....	9
2.2.2 부력재 (Buoyancy material).....	10
2.2.3 내압용기 (Pressure housing).....	10
2.2.4 추진기 (Thruster).....	11
2.2.5 커넥터 (Connector).....	14
2.2.6 Master PC (On-board PC).....	15
2.2.7 압력센서 (Pressure sensor).....	18
2.2.8 자력 컴퍼스 (Magnetic compass).....	20
2.2.9 배터리 (Batteries).....	23
2.2.10 제어시스템 구성도.....	24

3. NOAH의 모델링	25
3.1 NOAH의 수학적 모델.....	25
3.1.1 6 DOF 운동방정식.....	25
3.1.2 운동성능 해석	28
3.2 제어기 설계	34
3.2.1 수심제어.....	36
3.2.2 방향각제어.....	40
4. 구조실험	44
4.1 수심제어 실험	45
5. 결 론.....	49
참고문헌.....	51
Appendix.....	55
A. 추진력 계산.....	55
B. 부력 계산.....	56
감사의 글.....	57

List of Figures

Fig. 1	Overview of hovering AUV ‘NOAH’	7
Fig. 2	Side view of NOAH.....	8
Fig. 3	Back view of NOAH.....	8
Fig. 4	Frame structure.....	9
Fig. 5	Hull shape.....	9
Fig. 6	Pressure housing.....	11
Fig. 7	Tecnadyne thruster model 300.....	13
Fig. 8	Tecnadyne thruster model 280.....	13
Fig. 9	Schematic drawing of connector	14
Fig. 10	Pin description of thruster	15
Fig. 11	CPU (MOPSlcd7 PentiumIII 700MHz	16
Fig. 12	Power supply & DC/DC converter	17
Fig. 13	AD/DA board (Diammond-NN-16AT).....	17
Fig. 14	Whole system of master PC	18
Fig. 15	Pressure sensor (ECO-1).....	19
Fig. 16	Circuit for pressure sensor.....	20
Fig. 17	Dimension & circuit drawing	20
Fig. 18	Magnetic compass (TCM2-50).....	22
Fig. 19	Schematic drawing of magnetic compass	22
Fig. 20	Measuring range	23
Fig. 21	Lead-acid battery	23
Fig. 22	Lithium polymer battery	24
Fig. 23	Block diagram of control system.....	24
Fig. 24	Coordinate system of NOAH	26
Fig. 25	NOAH simulation program using Simulink.....	29
Fig. 26	NOAH dynamics blocks	29
Fig. 27	Simulation of spiral trajectory	30
Fig. 28	Input voltages to thrusters	31
Fig. 29	Linear velocity in spiral simulation	31
Fig. 30	Angular velocity in spiral simulation.....	32

Fig. 31	Displacement of X, Y, Z axis in spiral simulation	32
Fig. 32	Displacement of X-Y trajectory in spiral simulation	33
Fig. 33	Controller design for depth / heading control using Simulink	35
Fig. 34	Simulation result of depth control in 3D trajectory	37
Fig. 35	Depth control simulation result Z plane	37
Fig. 36	Depth control simulation result X-Z trajectory	38
Fig. 37	X, Y, Z displacement in depth control simulation.....	38
Fig. 38	Linear velocity in depth control simulation.....	39
Fig. 39	Angular velocity in depth control simulation	39
Fig. 40	Simulation result of heading control in 3D trajectory.....	41
Fig. 41	Yaw angle in heading control simulation	41
Fig. 42	Heading control simulation result in X-Y trajectory.....	42
Fig. 43	X, Y, Z displacement in heading control simulation.....	42
Fig. 44	Linear velocity in heading control simulation.....	43
Fig. 45	Angular velocity in heading control simulation	43
Fig. 46	Buoyancy and trim test of NOAH	44
Fig. 47	Depth control test in basin.....	45
Fig. 48	Depth control test in sea water basin	45
Fig. 49	Depth control with FIR filter	47
Fig. 50	Depth control with simulation result.....	47
Fig. 51	Depth control with FIR filter (2)	48
Fig. 52	Depth control with simulation result (2)	48

List of Tables

Table 1	Specification of ‘NOAH’	6
Table 2	Specification of thruster.....	12
Table 3	Specification of pressure sensor	19
Table 4	Specification of magnetic compass	21



1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

수중로봇(URVs, Underwater Robotic Vehicles)에 대한 연구는 1990년대 초부터 활발하게 진행되어 왔으며, 사람이 들어갈 수 없는 극한지형에서 많은 역할을 담당해 오고 있다. 예를 들면, 심해저나 군사 작전지역 및 원자력 발전을 하는 곳에서 많이 이용되고 있다[11]. 수중로봇의 활용분야로는 최근에 해양개발을 위해 무인잠수정(UUVs, Unmanned Underwater Vehicles)이 사용되고 있으며, 특히 해양자료수집, 해저 조사, 해저공사 및 해양구조물의 유지와 보수를 위해 필수 불가결한 도구로 사용되고 있다. 이러한 무인잠수정은 과거의 과학적 연구용이나 군사적인 목적의 범위를 벗어나 일반 산업용으로도 필요성이 점차 증대되어 고성능의 수중로봇 개발이 절실히 요구되고 있다. 특히 최근 심해저 자원 및 생물 탐사에 대한 연구가 활발하게 이루어지면서 그 역할에 대한 기대가 점차 증가하고 있다.

무인잠수정은 자율주행 성능을 갖는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 외부 조작자가 조작을 하는 ROV(Remotely Operated Vehicle)로 분류가 된다. AUV는 운행에 필요한 전력을 자체 보유하고 있는 배터리로부터 공급 받으므로 장거리 주행용으로 주로 사용되며, ROV는 운행에 필요한 전력을 모선으로부터 케이블(Tether)에 의해 공급받으므로 먼 거리를 운행하는데 제약이 따르게 되어 특정지역의 작업용으로 사용되고 있다. AUV는 배터리의 용량 제한으로 인해 장시간 운행이 불가능하다는 단점이 있다. 장시간 운행하기 위해서는 대용량의 배터리가 필요하나 이러한 대용량의 배터리를 장착하게 되면 잠수정의 무게가 증가하게 되어 운행에 제약을 주게 된다. 최근에는 AUV와 ROV의 단점을 보완하고자 AUV와 ROV의 성능이 결합된 형태의 수중로봇이 개발되고 있는데, 자율주행 성능을 갖는 ROV 및 특정공간에서 작업용으로 사용되는 AUV등이 그 대표적인 예이다. 특정공간에서 작업용으로

사용되는 AUV는 자세제어(Attitude control) 및 위치제어(Position control) 기능이 매우 중요하며 이러한 AUV를 hovering AUV라고 한다[28].

본 논문에서는 Hovering AUV를 제작하였으며, 제작된 AUV의 이름은 ‘NOAH’라 하였다. NOAH는 Test-bed의 목적을 가지고 있어 향후 연구에 기초가 되는 역할을 수행하게 될 것이다. 이를 위해 무인잠수정의 수학적 모델을 이용하여 운동특성을 해석하고 성능을 예측할 수 있는 시뮬레이터(Simulator)를 개발하고, 무인잠수정의 하드웨어 설계, 제작 및 자율주행을 위한 프로그램을 설계하여 hovering 기능을 수행하기 위한 자세제어(Attitude control)와 위치제어(Position control) 실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 실험결과를 바탕으로 차후 사용목적에 맞는 hovering AUV 시스템 개발에 기여함을 이번 논문의 목적으로 하고 있다. 차후 hovering 기능이 적용 가능한 분야로는 기존의 ROV가 해왔던 어장감시 및 수중작업을 일정한 구역 내에서 ROV의 케이블에 의한 간섭을 배제하고 AUV의 장점을 활용하여 작업을 수행할 수 있는 장점이 있다.

1.2 연구동향

무인잠수정에 대한 연구는 세계 각국에서 활발하게 이루어지고 있으며, 연구목적 이외에도 군사적인 목적과 상업적인 용도로 사용되고 있다. 우리나라의 무인잠수정에 대한 연구는 1990년대 초반 한국해양연구원의 300m급 ROV인 CROV300에 대한 연구를 시작으로 1996년 대우중공업에서 러시아로부터 6,000m급 AUV의 기술을 도입하여 심해저 탐사가 가능한 ‘OKPO 6000’을 개발하여 실 해역 실험을 실시하였고, 그 후 한국해양연구원에서 200m급 Test-bed AUV인 VORAM을 개발하였다. 그 이후로도 활발한 연구를 통해 ROV와 AUV에 대한 연구를 계속 해왔으며[22-25], 2006년 대양전기와 공동으로 6,000m급 심해작업용 ROV인 ‘해미래’와 심해진수장치 ‘해누비’를 개발하여 10월 말에서 11월 초에 태평양 실 해역 실험을 수행하였다

[26]. 또한, 한국 원자력연구소에서도 원전의 주요시설에 대한 감시와 점검을 위한 잠수정이 개발되어 운용되고 있다. 경수로 형 원자로의 경우 점검기간 중에 방사선 누출을 최소화하기 위해서 원자로 용기를 수중상태로 유지하고 있어 수중과 비슷한 환경을 가지고 있으나 방사능에 대한 위험이 뒤따르므로 방사능에 내구성이 강한 잠수정을 개발하여 사용하고 있다[27].

국외의 무인잠수정에 대한 연구는 국내보다 훨씬 일찍부터 시작하였으며, 기술력 또한 앞서 있다. 국외의 경우는 미국, 영국, 노르웨이, 일본, 스페인, 호주 등 약 12개국 이상의 국가에서 약 100종류 이상의 무인잠수정을 운용 또는 개발 중에 있으며, 이들 국가 중 미국이 가장 선도적인 역할을 수행하고 있다. 세계 각국의 무인잠수정은 자국의 국방 및 연구조사를 목적으로 하는 다양한 형태의 무인잠수정이 개발되어 왔었고, 현재에도 다양한 목적을 갖는 무인잠수정을 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다[11]. 특히, 미국의 경우 대학과 연구소를 중심으로 활발한 연구가 진행중인 데 MIT대학, 하와이대학(UH), 플로리다아틀란틱 대학(FAU)과 미 해군대학원(NPS) 등에서 많은 연구를 수행하였으며, 우즈홀 연구소를 비롯하여 몇몇의 연구소에서 제작된 무인잠수정들이 다양한 연구를 수행하고 있다. 특히, 군사적인 목적으로 사용된 REMUS AUV는 걸프전에서 기뢰 탐색에 이용되어 높은 성과를 이루어 상업화되었고, 미 해군에서는 Manta 프로젝트를 통해 전투용 무인잠수정에 대한 투자와 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

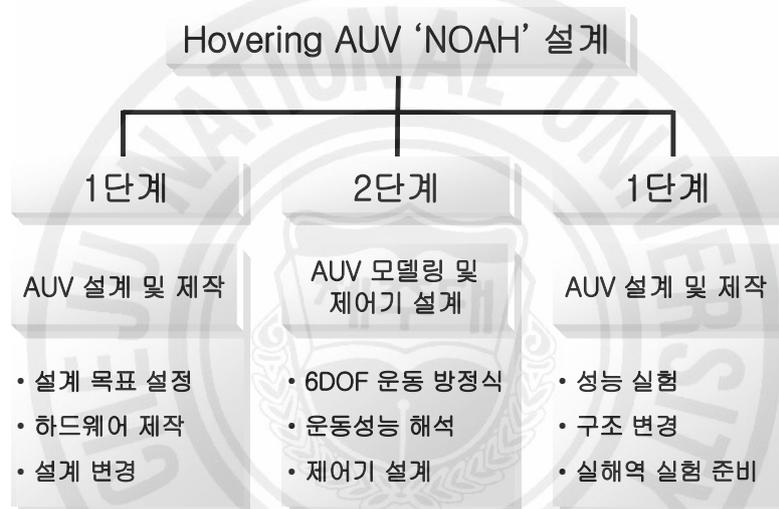
1.3 연구내용

본 논문에서는 hovering 기능을 갖는 AUV의 설계, 제작 및 실험에 대하여 연구하였으며, 이를 위해 다음과 같은 3단계과정으로 연구를 수행하였다.

1단계: AUV 설계 및 제작

2단계: AUV 모델링 및 제어기 설계

3단계: AUV 수조실험



1단계의 설계 및 제작은 2단계의 모델링 및 제어기 설계과정의 피드백을 받아 수정 보완하게 되며, 3단계의 수조실험 또한 2단계의 결과를 이용하여 수행하게 된다.

본 논문의 구성은 2장에서 NOAH의 하드웨어 설계에 대해서 서술하고 각 하드웨어에 대하여 기술하였으며, 3장에서는 NOAH의 모델링을 통한 운동성능을 해석하고 수심제어와 방향각 제어를 위한 제어기를 설계하였다. 4장에서는 수조 실험을 통한 수심제어에 대해 서술하였고 마지막으로 5장 결론에서는 제작과정과 실험을 통해 얻어진 결과에 대해 설명하고 추후 연구에 대해서 기술하였다.

2. NOAH의 개발

2.1 설계목표

AUV의 설계과정에서 사용목적은 정하는 일은 무엇보다도 중요하며, 이에 따라서 적절한 형상, 적재하중, 항해수심 및 주행속도 등이 결정된다. 사용목적에 따라 AUV의 외부형상이 결정되고, 적재하중으로는 AUV의 자세나 위치를 측정하기 위한 센서와 AUV의 구동장치 그리고 임무수행을 위한 센서들이 포함된다. 항해수심은 압력용기의 성능에 따라 결정되며, 주행속도는 항력이나 추진력 그리고 유체동역학 계수를 추정하기 전 단계부터 결정되어야 한다. 이러한 설계조건을 바탕으로 제작한 NOAH의 사용목적은 실험수조 내에서 AUV의 자율주행 성능과 센서 및 제어기의 성능을 실험하기 위한 Test-bed의 역할을 담당하고 있다. 제작된 Test-bed의 실험을 통해서 제어 알고리즘을 개선할 수 있고, 추진장치의 배치 및 계측장치의 성능을 개선할 수 있는 유용한 도구로 사용될 것이다. 이러한 Hovering AUV의 사용목적 을 이루기 위한 NOAH의 사양은 Table 1과 같다.

전체적인 외형은 ROV와 비슷한 프레임구조를 하고 있으며, 크기는 75cm×50cm×50cm 이며 무게는 추후 장착될 센서의 무게만큼의 유효하중(Payload)을 포함하여 70kgf이고, 중성부력을 맞추기 위해 납을 장착하였다. 부력계산은 부록 B에 설명하였다. 최대 운용가능 수심은 부력재의 재질을 고려하여 20m로 설계하였으며, 최대 운용속도 또한 1.8m/s로 설계하였으며 추진력계산은 부록 A에 설명하였다. 추진기는 350W의 주 추진기 2대와 300W의 수직과 수평 추진기를 사용하였으며, 4자유도의 운동이 제어 가능하다. 시스템을 운용하기 위한 소형의 On-board PC를 사용하였으며, 압력센서와 자력 컴퍼스가 장착되어 있으며 추후 소나와 카메라가 장착될 예정이다. 통신방법으로는 RS-232통신과 Ethernet을 이용한 TCP/IP통신을 사용하였다.

Table 1 Specification of 'NOAH'

Parameters	Specifications
Hull	Frame Type
Dimension	0.75m × 0.5m × 0.5m
Weight	70kgf (in air)
Max. Operating Depth	20m
Max. Speed	1.8m/s
Thrusters	350watt × 2 (longitudinal) 300watt × 2 (lateral / vertical)
Control	4 DOF (Surge, Sway, Heave, Yaw)
Computer	On-board PC (Pentium III 700MHz)
Navigation Sensors	Pressure sensor, Magnetic compass
Power Supply	12V-12AH Lead Acid Battery × 5EA 18.5V-3.2AH Lithium-Polymer Battery × 1EA
Communications	RS-232, Ethernet (TCP/IP)

2.2 하드웨어 제작

본 연구에서 제작한 Hovering AUV ‘NOAH’의 전체 모습은 Fig. 1-3과 같다. 외형은 일반적인 ROV의 형태와 비슷한 프레임구조를 하고 있으며, 이러한 구조는 각종 센서를 장착하기 쉽고 공간 활용도가 높은 장점이 있다. 부력재를 사용하여 중성부력을 유지하도록 하였으며, 선미에 주 추진기 2개와 선체 중앙에 수직과 횡 방향 추진기를 각각 1개씩 장착하였다. NOAH의 자율주행을 위한 전기장치, 계측장치 및 제어장치는 선수와 선체 양쪽에 위치한 내압용기에 들어있다. 선수의 내압용기에는 On-board PC, 압력계, 자력컴퍼스 및 리튬폴리머 배터리가 들어가고, 선체 양쪽에 위치한 내압용기에는 추진기에 전원을 공급하기 위한 납 축전지가 각각 2개씩 장착되어 있다.



Fig. 1 Overview of hovering AUV ‘NOAH’



Fig. 2 Side view of NOAH

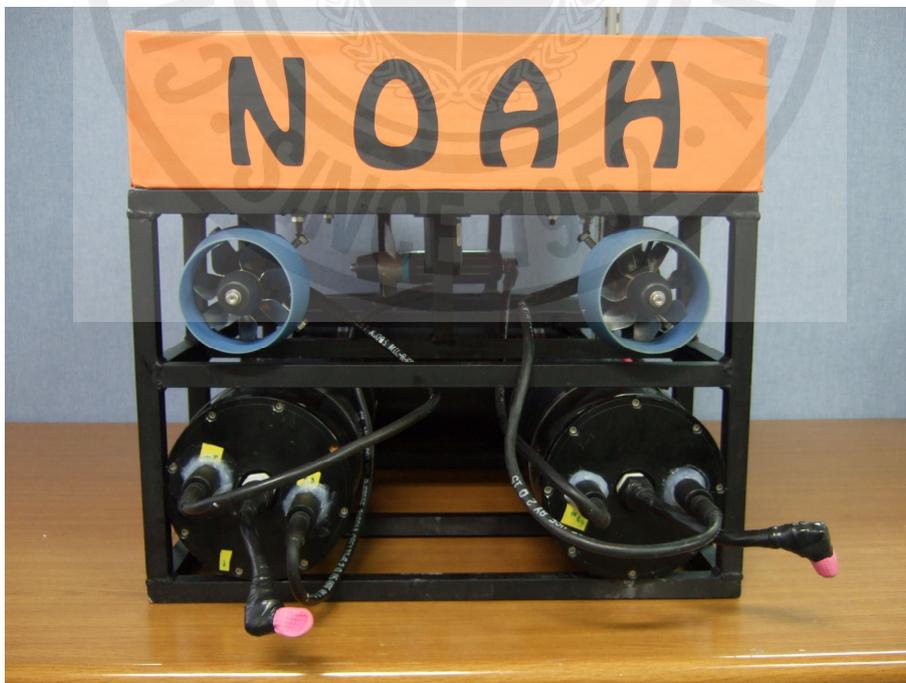


Fig. 3 Back view of NOAH

2.2.1 선형 (Hull shape)

AUV는 외부형상에 따라 실린더형(Cylinder type), 유선형(Hydro dynamic type), 플랫피쉬형(Flatfish type)으로 나뉜다. 각각의 종류의 대표적인 예로는 실린더 형은 상업적으로 성공을 거둔 REMUS[14], 유선형은 미국의 MIT대학에서 만든 Odyssey[10], 플랫피쉬 타입은 미국 해군대학원(NPS)에서 만든 ARIES와 Pheonix가 대표적이다[5-6]. 본 연구에서 제작한 ‘NOAH’의 선형은 일반적인 ROV의 구조와 비슷한 프레임 구조로 되어있으며, Fig. 4-5와 같다. 이러한 구조는 적재하중을 장착하기 편리하고 공간사용 효율이 매우 높은 장점이 있다. 제원은 0.75m × 0.5m × 0.5m이며 사각형의 박스로 되어있으며, 재질은 부식을 방지하기 위해 스테인리스 스틸 (Stainless steel)을 사용하고 있다.



Fig. 4 Frame structure

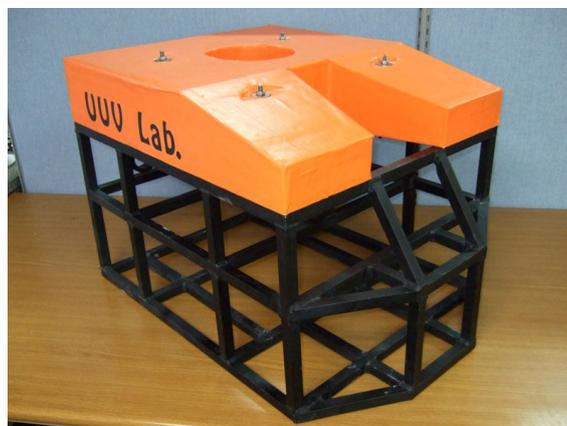


Fig. 5 Hull shape

2.2.2 부력재 (Buoyancy material)

NOAH의 프레임 자체만으로는 무게가 많이 나가기 때문에 음성부력을 갖게 되는데 이를 보상하기 위해서 별도의 부력재를 부착하여야 한다. 부력재는 압축 스티로폼을 이용하여 만들었으며, 스티로폼의 표면이 물에 젖는 것을 방지하기 위하여 방수용지를 부착하였다. 방수용지는 물 속에서 쉽게 구별을 할 수 있도록 형광 색을 사용하였다. 심해에 들어가는 부력재인 경우에는 특수재질을 이용한 부력재를 만들지만 본 연구에서 제작한 NOAH의 경우에는 설계수심이 20m이므로 압축 스티로폼을 사용해도 부력에는 큰 문제가 없다.

2.2.3 내압용기 (Pressure housing)

AUV 내부에는 대기압을 유지하며 기계 및 전자장비 등을 탑재할 수 있는 내압용기(Pressure housing)가 반드시 필요한데, 특성상 한정된 공간 내에 배터리 및 통신장비 등의 전자장비가 대기압을 유지하고 수밀(Water proof)을 유지하면서 안전하고 효율적으로 탑재되어야 한다. NOAH에는 세 개의 내압용기가 있는데 각각의 내압용기는 원통형으로 되어있으며 Fig. 6와 같다. 선수 부분에 장착된 내압용기 내부에는 Master PC와 Magnetic compass, 압력센서, PC와 센서에 전원을 공급할 리튬폴리머 배터리가 들어 있고, 외부의 PC와 연결하기 위한 케이블을 위한 커넥터와 PC전원용 스위치, 신호선과 추진기의 모터드라이버용 전원 연결을 위한 케이블 그랜드가 있으며, 선체 양 옆에 위치한 나머지 두 개의 내압용기 내부에는 추진기에 전원을 공급하기 위한 납 축전지가 2개씩 들어 있으며, 추진기를 연결하기 위한 수중용 커넥터가 2개씩 부착되어 있다. 압력용기의 재질은 폴리에틸렌(Polyethylene)이며, 압력용기의 뚜껑은 알루미늄 재질로 되어있고 압력용기 내부로 물이 들어오는 것을 방지하기 위하여 O-ring 처리가 되어있으며, 내압용기와의 압착을 증가시키기 위해서 각 뚜껑마다 8개의 볼트를 사용하고 있다.



Fig. 6 Pressure housing

2.2.4 추진기 (Thruster)

추진기는 AUV의 속도를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서 제작한 NOAH에는 총 4개의 추진기가 사용되었다. 두 개는 전후방 방향으로 선체 후미에 설치하여 전후진(Surge) 및 요우(Yaw) 운동을, 다른 하나는 수직방향으로 부착해 수직(Heave) 운동을, 또 다른 하나는 좌우방향으로 설치하여 횡(Sway) 운동을 제어하도록 배치하여 4자유도 운동이 가능하도록 하였다. 수중용 추진기를 제작하는 데에는 수밀을 해야 하는 기계적인 어려움이 따르기 때문에 널리 사용되고 있는 상용화된 제품을 구입하였다. NOAH에 사용된 추진기는 Tecndyne사에서 제작한 BLDC(Brushless DC) 모터이며, Model 300 (Fig. 7)과 Model 280 (Fig. 8) 제품을 사용하였다. 사용된 추진기는 Table 2의 설명과 같이 24V의 주 전원을 사용하며, 12V의 모터 드라이버 전원을 사용하고, $\pm 5V$ 의 신호를 주어 동작하게 된다.

추진기 사용시 가장 유의해야 할 사항은 추진기의 24V 파워 그라운드와 추진기 모터 드라이버의 12V 파워 그라운드가 추진기 내부에서 물리도록 되어 있기 때

문에 외부에서는 반드시 분리되어야 한다. 만일 분리되지 않을 경우 그라운드 루프가 발생해서 모터 컨트롤러 모듈이나 맞물려 있는 다른 회로 모듈에 과전류가 흘러 소자가 타버리게 된다. 추진기는 여러 전자 회로 중에 가장 큰 고압이 걸리는 부분 이므로 각별히 주의를 기울이거나 회로를 분리해서 다른 회로에 손상이 가지 않도록 해야 한다. 추진기의 속도제어 방법에는 Tachometer를 이용하여 추진기의 RPM 속도를 이용하여 제어하는 방법도 있으나 본 연구에서는 선체속도와 위치를 이용하여 제어하는 방법을 사용하고자 한다.

Table 2 Specification of thruster

Thruster Specification		
Model	Model 280	Model 300
Output Thrust	Forward 5.4kg	Forward 8.2kg
	Reverse 5.4kg	Reverse 3.6kg
Input	24 VDC	
	Power Ground	
	+12V Instrument Power	
	-12V Instrument Ground	
	± 5 V Command	
Weight	1.0kg in air	1.0kg in air
	0.8kg in water	0.7kg in water
Depth Rating	850m	



Fig. 7 Tecnadyne thruster model 300



Fig. 8 Tecnadyne thruster model 280

2.2.5 커넥터 (Connector)

추진기와 Master PC의 TCP/IP 커넥터를 연결하기 위해서는 수중에서 사용이 가능한 커넥터를 이용하여야 한다. 방수가 되는 부분에서 밖으로 전기적으로 연결을 해 주면서 내압성능이나 방수성능에 영향을 미쳐서는 안되며, 쉽게 풀어져서도 안된다. 또한 접촉부분의 전기저항이 낮아서 전력공급이 원활해야 하며 신호의 감쇄도 적어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 커넥터를 제조하는 회사는 많지 않다.

Impulse와 Seacon이 대표적인 회사이며, 대부분의 무인잠수정에 사용되고 있다. 본 연구에서 제작한 NOAH에서는 추진기의 커넥터와 같은 Impulse사의 커넥터를 사용하였다. 추진기와 연결되는 커넥터는 Impulse사의 LSG-6-BCL 모델이며 다음의 Fig. 9과 같다. 커넥터는 추진기에 연결하기 위해서 6 Pin 제품을 이용하였으며, LAN 케이블 커넥터 또한 6 Pin 제품을 사용하였다. 커넥터를 연결하는 방법은 내압용기 가공 시에 내압용기에 나사산을 내어 볼트를 돌려 끼우듯이 커넥터를 연결하였다. 결합 시에는 O-ring 부분에 그리스를 바르고 테플론 테이프로 나사부분을 감아주어 방수효과를 높였다.

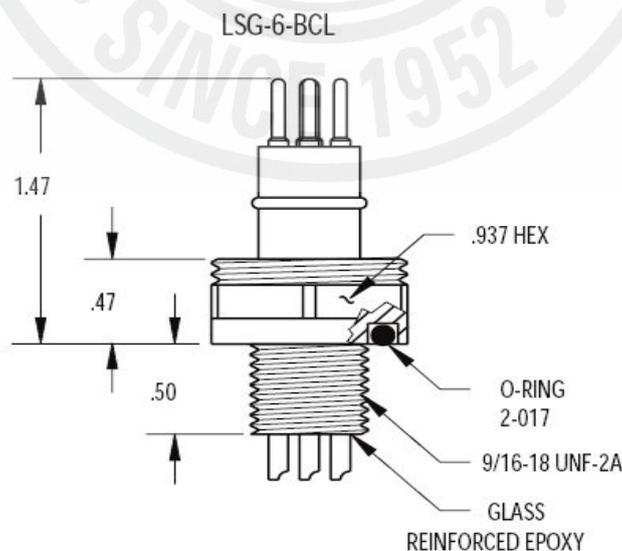


Fig. 9 Schematic drawing of connector

내압용기에 부착된 커넥터와 연결될 추진기 커넥터의 핀 구성은 다음 Fig. 10과 같다.

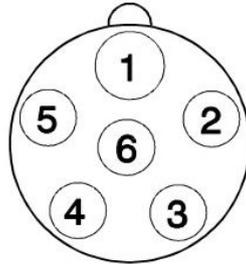


Fig. 10 Pin description of thruster

1. 24VDC MOTOR POWER GROUND
2. +24 VDC MOTOR POWER
3. ISOLATED INSTRUMENT POWER GND
4. +12 VDC INSTRUMENT POWER
5. ± 5 V ANALOG CONTROL SIGNAL
6. 0-5 V ANALOG SPEED OUTPUT

2.2.6 Master PC (On-board PC)

본 연구에서 제작한 Hovering AUV의 운용과 제어를 위해서 On-board PC를 사용하였다. 현재 운용되고 있는 많은 AUV에서 소형의 On-board PC를 많이 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서도 가로×세로가 10cm ×10cm 정도인 소형의 On-board PC를 사용하였다. 컴퓨터는 Fig. 11에서 보는 것처럼 소형이며, 이러한 소형의 On-board PC를 PC-104라고 부르고 104개의 Bus pin으로 연결할 수 있는 Single-board Computer이다.

CPU(Central Processing Unit)는 Kontron사의 MOPSlcd7 모델이며, 사양은 Pentium III-700Mhz, 512MB RAM을 가지고 있다. 여기에 Bus pin을 이용해서 PC와 추진기의 모터드라이버에 전원을 공급하기 위한 DC/DC 컨버터(Fig. 12)와 압력센서에서 들어오는 신호와 추진기에 신호를 보내주기 위한 AD/DA보드(Fig. 13), 운영프로그램(Operating system)과 제어프로그램을 위한 40GB 하드디스크를 연결해 Master PC시스템을 완성하였다(Fig. 14). DC/DC 컨버터는 Jupiter사에서 제작한 Jupiter-MM 모델을 사용하였다. 사용된 DC/DC 컨버터는 7-30VDC의 입력을 받아서 $\pm 5V$ 와 $\pm 12V$, Output 그라운드를 출력으로 내보낸다. 여기서 나오는 +5V가 PC의 메인보드를 돌리는데 사용되고 $\pm 12V$ 는 추진기의 모터드라이버와 압력센서를 구동시키는데 사용된다. AD/DA 보드는 Diamond 사의 DIAMOND-MM-16AT 모델을 사용하고 있으며, 이 보드는 4개의 아날로그 출력신호를 내보낼 수 있으며 8개의 디지털 입력과 출력 신호를 받고 내보낼 수 있다. 아날로그 출력 신호는 $\pm 5V$ 의 신호를 내보낼 수 있으며, 이 신호로 추진기의 동작을 제어할 수 있다.



Fig. 11 CPU (MOPSlcd7 Pentium III 700MHz)

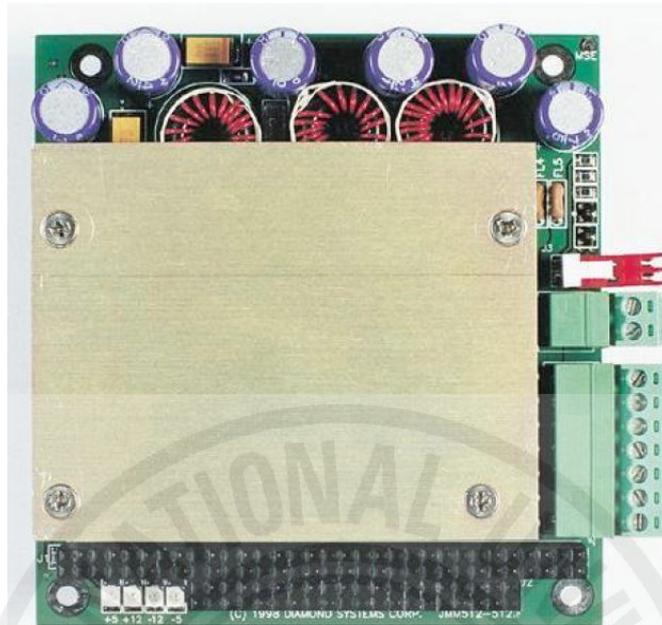


Fig. 12 Power supply & DC/DC converter

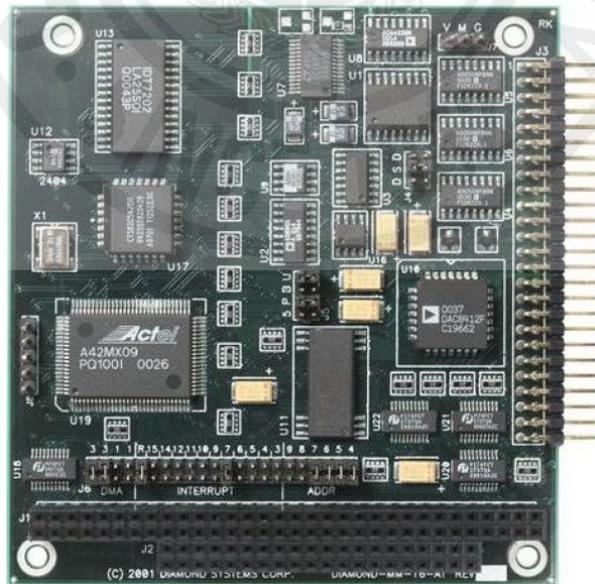


Fig. 13 AD/DA board (Diamond-NN-16AT)

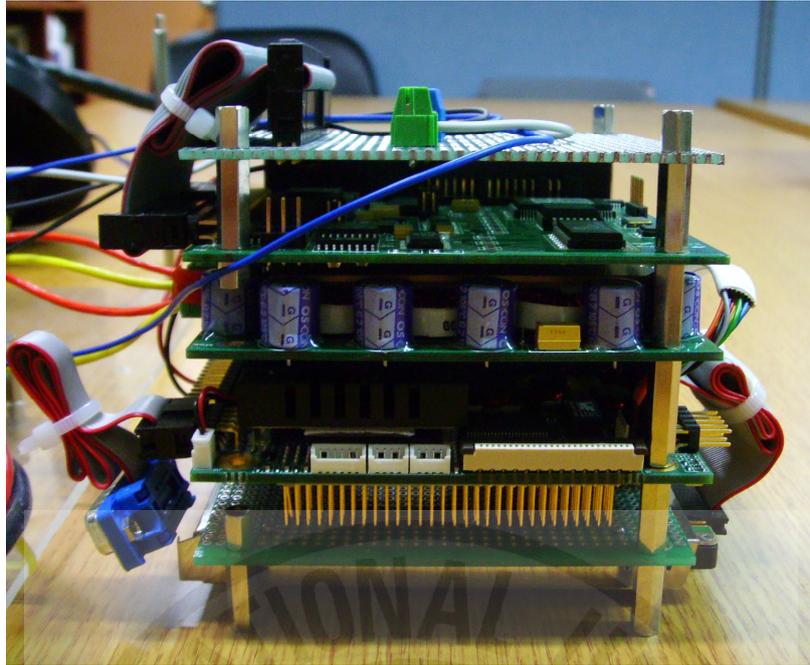


Fig. 14 Whole system of master PC

2.2.7 압력센서 (Pressure sensor)

Hovering 기능을 갖는 AUV에서 깊이 측정은 가장 중요한 요소이다. 깊이 방향에 대한 제어를 하기 위해서 수중에서의 깊이 측정을 위해 압력계를 장착 하였으며 Fig. 15 와 같다. 본 연구에 사용된 압력계는 Table 3에서 보는 것과 같이 측정 가능 수심이 0m ~ 20m까지 인 압력계를 사용하였으며, 10 ~ 30V의 입력전압을 주었을 때 4 ~ 20mA의 범위인 출력을 내보낸다. 이 전류신호를 전압으로 바꿔주기 위해서 Fig. 16과 같은 저항을 통과하는 간단한 회로를 만들어서 전압신호를 얻어내 AD보드로 아날로그 신호를 보낸다. NOAH에 장착된 압력계는 Fig. 15에서 스테인리스로 된 나사부분만 방수가 되기 때문에 압력계 앞 부분의 나사가 내압용기의 뚜껑에 고정되어 수압을 측정하게 된다. 압력센서의 치수와 연결방식은 Fig. 17에 도식하였다.

Table 3 Specification of pressure sensor

Magnetic Compass Specification	
Measuring Range	0-2bar
Output	DC 4-20mA
Supply Voltage	10-36DCV
Accuracy	±0.2%



Fig. 15 Pressure sensor (ECO-1)

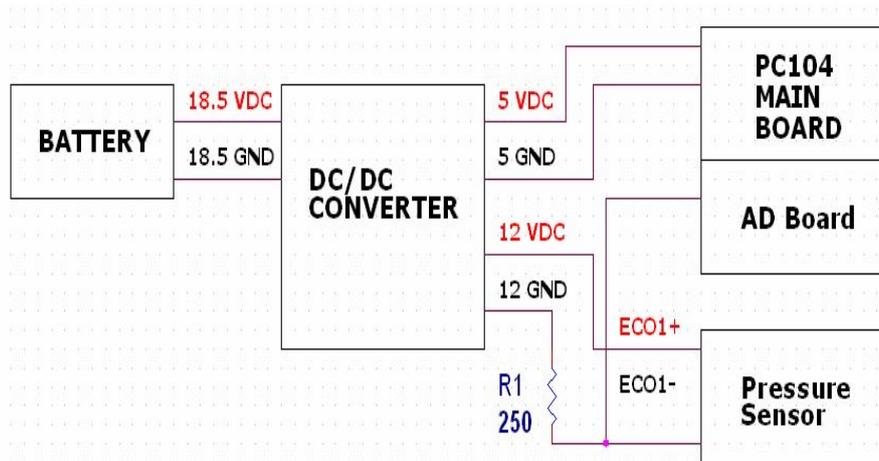


Fig. 16 Circuit for pressure sensor

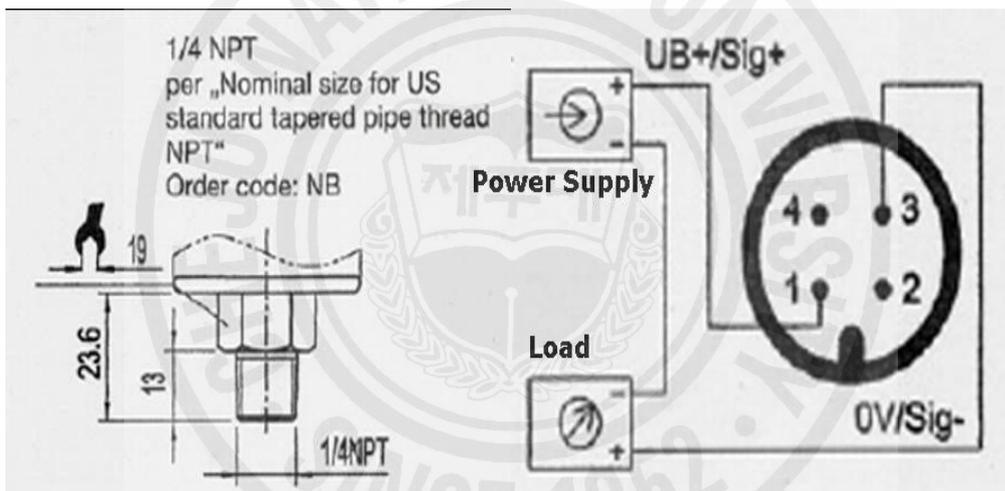


Fig. 17 Dimension & circuit drawing

2.2.8 자력 컴퍼스 (Magnetic compass)

Hovering AUV의 또 다른 기능인 위치제어를 위해 무인 잠수정의 방향각도 (Heading angle)와 경사를 측정하기 위해서 Magnetic compass를 사용하였다. 마그네틱 컴퍼스는 Fig. 18과 같은 PNI사의 TCM2-50 모델을 사용하였으며, 이 컴퍼스는 Table 4와 같은 특성을 가지고 있으며, 3축을 가지고 있어서 경사각이 발생했을 때 경사각을 보정한 방향각을 측정할 수 있다. 각도 측정 시에는 1.0° 의 정확도와 0.1° 의

분해능력을 가지고 있고, 경사각 측정요소인 피치(Pitch)각과 롤(Roll)각 측정 시 모두 1.0° 의 정확도를 가지며, 0.3° 의 분해능력을 가지고 있으며, $\pm 50^\circ$ 까지 경사각을 측정할 수 있다. 출력은 10개의 Pin을 통해서 PC와 RS232 시리얼 통신을 하며 PNI사에서 제공되는 프로그램을 통해 측정되는 값을 화면에서 볼 수 있다. 컴퍼스의 크기와 측정범위는 Fig. 19-20과 같다.

Table 4 Specification of magnetic compass

Specification of Magnetic Compass		
Dimensions (L×W×H)	6.4×5.1×3.175 cm	
Weight	45.5 g	
Supply Voltage	5VDC	
Heading	Accuracy	1.0° RMS
	Resolution	0.1°
Pitch Accuracy	1.0° RMS	
Roll Accuracy	1.0° RMS	
Tilt	Range	$\pm 50^\circ$
	Resolution	0.3°
Connector for RS-232 Interface	10-Pin	
Operating Temperature	-20° to $+70^\circ$ C	



Fig. 18 Magnetic compass (TCM2-50)

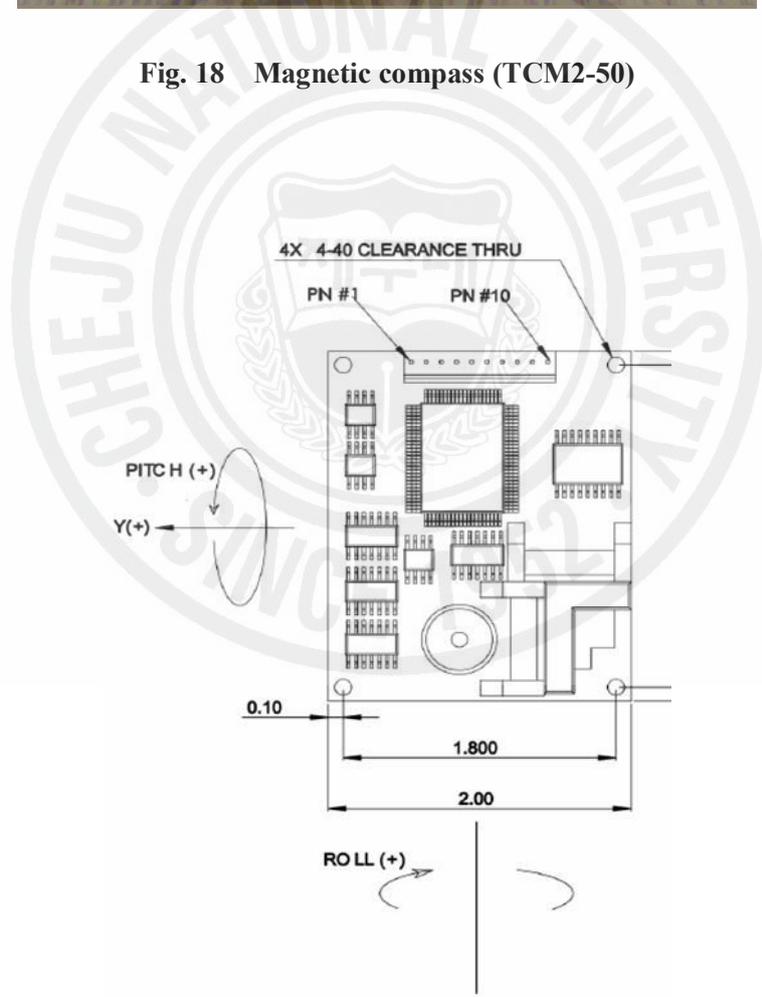


Fig. 19 Schematic drawing of magnetic compass

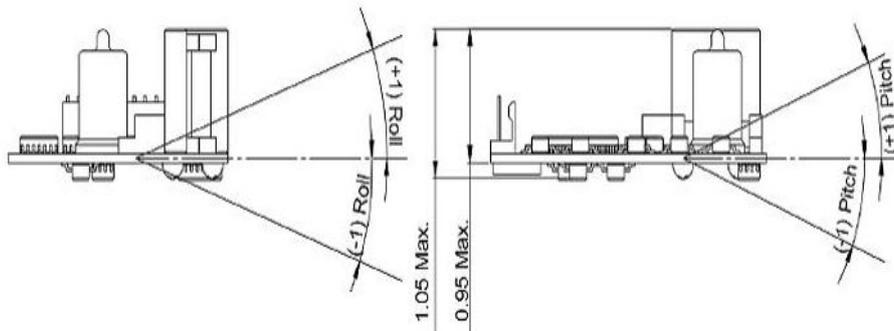


Fig. 20 Measuring range

2.2.9 배터리 (Batteries)

본 연구에서 제작한 NOAH에 사용된 배터리는 두 가지 종류이다. 추진기에 주 전원을 공급하는 Fig. 21과 같은 12V 12AH의 납 축전지 4개와 Master PC와 압력센서, 마그네틱 컴퍼스, 추진기의 모터드라이버에 전원을 공급하기 위한 Fig. 22와 같은 18.5V 3.2AH의 리튬폴리머 배터리가 사용되었다. 리튬폴리머 배터리가 용량에 비해 무게가 적어 무인잠수정의 무게를 줄이는데 큰 역할을 하지만 가격이 비싸다는 단점이 있고 납 축전지는 성능에 비해 무게가 상대적으로 많이 나가는 단점이 있다.



Fig. 21 Lead-acid battery



Fig. 22 Lithium polymer battery

2.2.10 제어시스템 구성도

위에서 언급한 구동장치, 제어장치 및 계측장치를 이용하여 NOAH의 자세 및 위치제어를 하게 되며, 제어시스템의 구성도는 Fig. 23과 같다.

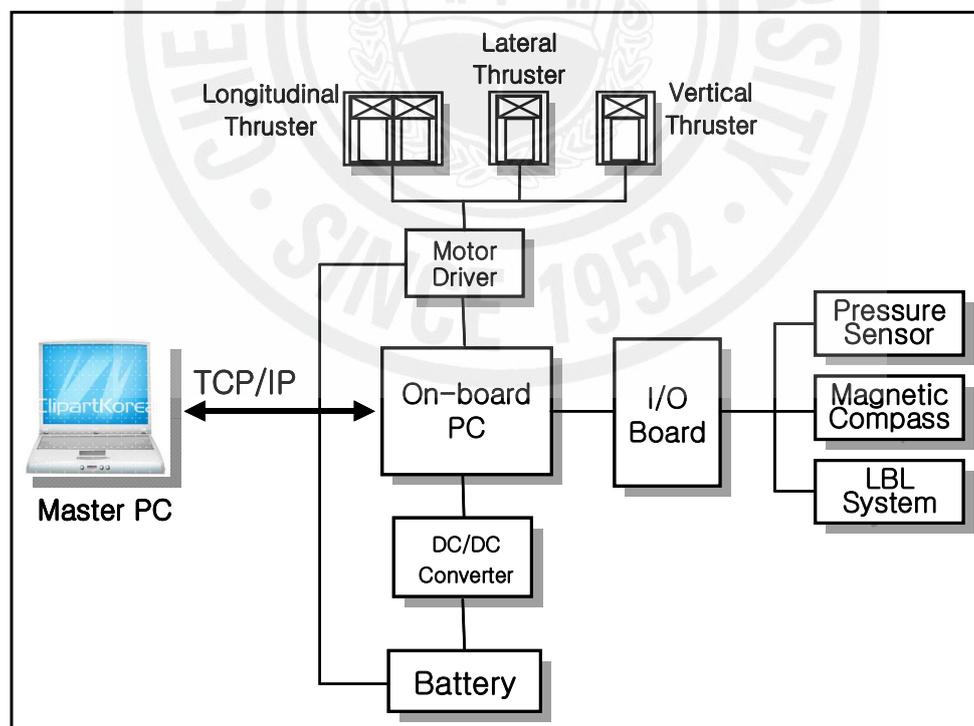


Fig. 23 Block diagram of control system

3. NOAH의 모델링

3.1 NOAH의 수학적 모델

AUV의 수학적 모델은 6자유도의 운동방정식으로 표현되며, 상당수의 유체동역학계수에 의한 힘과 모멘트로 모델링 되어있다. AUV의 운동방정식은 운항특성이나 형상, 부가물의 종류와 수에 따라 다르게 표현될 수 있으며, 유체역학계수를 찾는 방법에 따라서도 무시되는 항이 달라질 수도 있다. 또한 방정식에 포함되는 유체동역학계수들은 실험이나 추정에 의해 얻어지며 잠수정에 따라 다르게 나타난다 [15]. AUV 모델링에 관련된 많은 연구가 진행되어 왔는데, Gertler와 Hagen은 잠수함의 운동 해석에 있어서 표준이 되는 운동방정식을 정리하였고[3], Feldman은 실제와 더욱 근사한 수정된 운동방정식을 제시하였다[21]. Fossen은 잠수정의 비선형 제어시스템 설계를 위한 모델식을 전개하였고[12], Healey와 Lienard는 6자유도의 비선형 운동방정식과 유체동역학 계수를 제시하였다[5].

본 연구에서는 NOAH의 모든 운동상태를 해석할 수 있도록 6자유도의 비선형 운동방정식을 유도하고, 이러한 운동방정식을 풀 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 다양한 입력과 환경 하에서 NOAH의 운동성능을 해석하고자 한다.

3.1.1 6 DOF 운동방정식

NOAH의 운동성능을 해석하기 위하여 본 연구에서는 6자유도의 운동방정식을 사용하였다. 무인잠수정의 6자유도 운동방정식은 참고문헌 [15]에 잘 나타나 있으며 모델링 방법에 따라 조금씩 차이가 있다. 수학적 모델을 위한 좌표계는 Fig. 24와 같다.

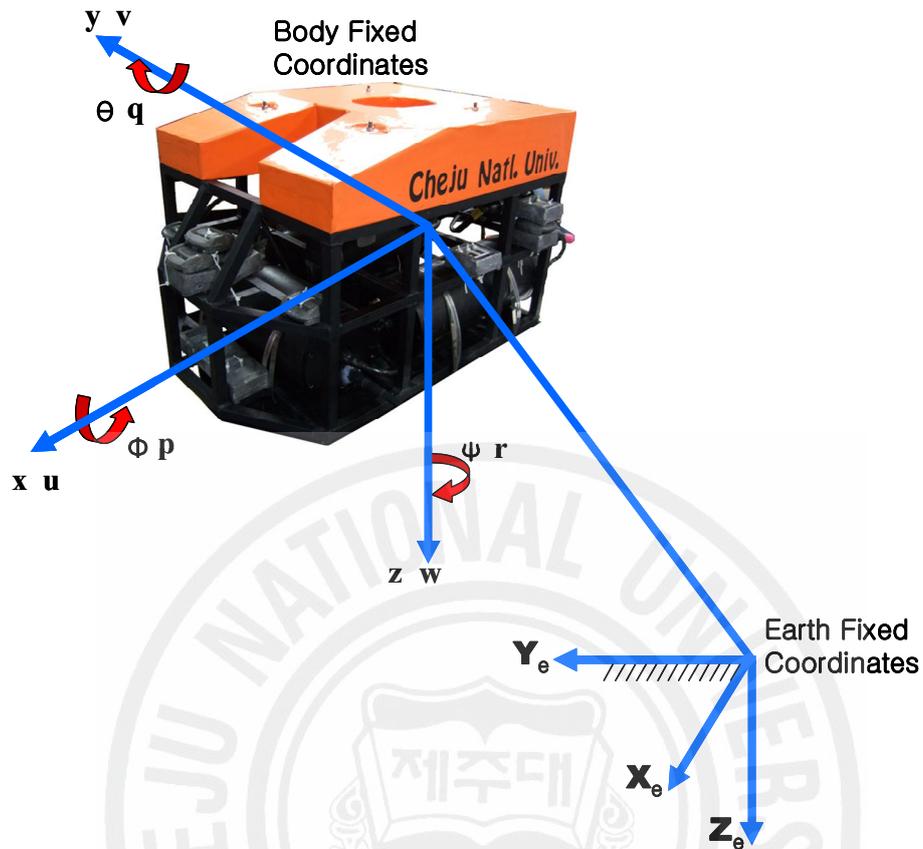


Fig. 24 Coordinate system of NOAH

수학적 모델을 위한 좌표계는 X_e , Y_e 및 Z_e 축을 사용한 지구고정좌표계(Earth fixed coordinate)와 x , y , z 축을 사용한 선체고정좌표계(Body fixed coordinate)를 사용하고 있으며, 선체고정좌표계는 선수 방향을 x 축, 우현방향을 y 축 그리고 연직하방을 z 축으로 나타낸다. 6자유도의 운동은 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)의 병진운동과 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 회전운동으로 분류되며 각각의 운동방정식은 식(1)과 같으며 각각의 변수와 파라미터에 대한 자세한 설명은 Notation에 표기 하였다.

$$\begin{aligned}
\text{Surge:} \quad & m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X \\
\text{Sway:} \quad & m[\dot{v} + ur - wp + x_G(pq + \dot{r}) + y_G(p^2 - r^2) + z_G(qr + \dot{p})] = Y \\
\text{Heave:} \quad & m[\dot{w} - uq + vp + x_G(pq - \dot{q}) + y_G(qr - \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] = Z \\
\text{Roll:} \quad & I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{yz}(q^2 - r^2) - I_{xz}(pq + \dot{r}) \\
& + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} + ur - wp)] = K \\
\text{Pitch:} \quad & I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr - I_{xy}(qr + \dot{p}) + I_{yz}(pq - \dot{r}) + I_{xz}(p^2 - r^2) \\
& - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} + ur + wp)] = M \\
\text{Yaw:} \quad & I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(pr + \dot{q}) - I_{xz}(qr - \dot{p}) \\
& + m[x_G(\dot{v} + ur - wp) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N
\end{aligned} \tag{1}$$

위 식들의 우측 항들은 잠수정에 작용하는 힘 벡터 및 모멘트 벡터의 각 방향 성분을 나타내며, 유체력과 모멘트 모델에는 Gertler 와 Abkowitz등 잘 알려진 모델 [3]이 있으며, AUV와 같은 저속 운항체에 적용하기에 적합한 Cross Flow를 고려한 모델도 발표되었다[21]. 본 논문은 미 해군대학원에서 전개한 식[5]을 사용하였고 외력과 외력 모멘트에서 운동성능에 영향이 적은 비선형 계수는 무시하고 선형감쇠계수와 부가질량계수를 사용하였으며 다음과 같다. 각각의 계수는 NOAH의 크기와 중량에 맞도록 미 해군대학원 AUV II의 계수를 변화시켜 사용하였다.

$$X = \frac{\rho}{2} L^3 [X_{\dot{u}} \dot{u} - (W - B) \sin \theta - \frac{1}{2} \rho A_x C_{dx} u^2] + X_{prop} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
Y = & \frac{\rho}{2} L^4 [Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r}] + \frac{\rho}{2} L^3 [Y_{\dot{p}} \dot{p} + Y_p u p + Y_r u r] \\
& + \frac{\rho}{2} L^2 [Y_v u v] + (W - B) \cos \theta \sin \phi - \frac{1}{2} \rho A_y C_{dy} v^2 + Y_{prop}
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
Z = & \frac{\rho}{2} L^4 [Z_{\dot{q}} \dot{q}] + \frac{\rho}{2} L^3 [Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_q u q] + \frac{\rho}{2} L^2 [Z_w u w] \\
& + (W - B) \cos \theta \cos \phi - \frac{1}{2} \rho A_z C_{dz} w^2 + Z_{prop}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$K = \frac{\rho}{2} L^5 [K_{\phi} \dot{\phi} + K_{\psi} \dot{\psi}] + \frac{\rho}{2} L^4 [K_{\dot{\phi}} \dot{\phi} + K_p up + K_r ur] + \frac{\rho}{2} L^3 [K_v uv] - (z_G W - z_G B) \cos \theta \sin \phi + K_{prop} \quad (5)$$

$$M = \frac{\rho}{2} L^5 [M_{\phi} \dot{\phi}] + \frac{\rho}{2} L^4 [M_{\dot{\phi}} \dot{\phi} + M_q uq] + \frac{\rho}{2} L^3 [M_w uw] - (z_G W - z_B B) \sin \theta + M_{prop} \quad (6)$$

$$N = \frac{\rho}{2} L^5 [N_{\phi} \dot{\phi} + N_{\psi} \dot{\psi}] + \frac{\rho}{2} L^4 [N_{\dot{\phi}} \dot{\phi} + N_p up + N_r ur] + \frac{\rho}{2} L^3 [N_v uv] + N_{prop} \quad (7)$$

또한, 잠수정의 자세와 위치에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \theta \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= u \cos \psi \cos \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) + w (\cos \psi \sin \theta \sin \phi + \sin \psi \sin \phi) \\ \dot{Y} &= u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\ \dot{Z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (9)$$

3.1.2 운동성능 해석

전개된 6자유도의 운동방정식을 이용하여 NOAH의 운동성능을 해석하기 위하여 Matlab의 Simulink를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. Simulink는 비선형 운동방정식의 시뮬레이션에 편리하도록 그래픽 툴을 제공하고 있으며, Matlab은 제어시스템의 해석과 설계에 강력한 툴을 많이 포함하고 있다. 따라서 이들을 이용하면 제어기 개발을 위한 시뮬레이션 환경이 용이하게 구축될 수 있다. Fig. 25는 개발된 Simulink 모델을 보여주고 있으며, 각 블록들은 내부에 여러 개의 보조블록으로 구성되어있다. Fig. 25에서 Dynamics 블록을 클릭하면 Fig. 26과 같은 보조블록으로 구성되어있고 6자유도 운동을 해석하는 또 다른 보조블록으로 구성되어있다.

이러한 모듈화된 구성방법은 사용자가 전체구조를 쉽게 파악할 수 있고, 그래픽 환경을 제공함으로써 모델의 확장 및 수정작업이 편리한 장점이 있다.

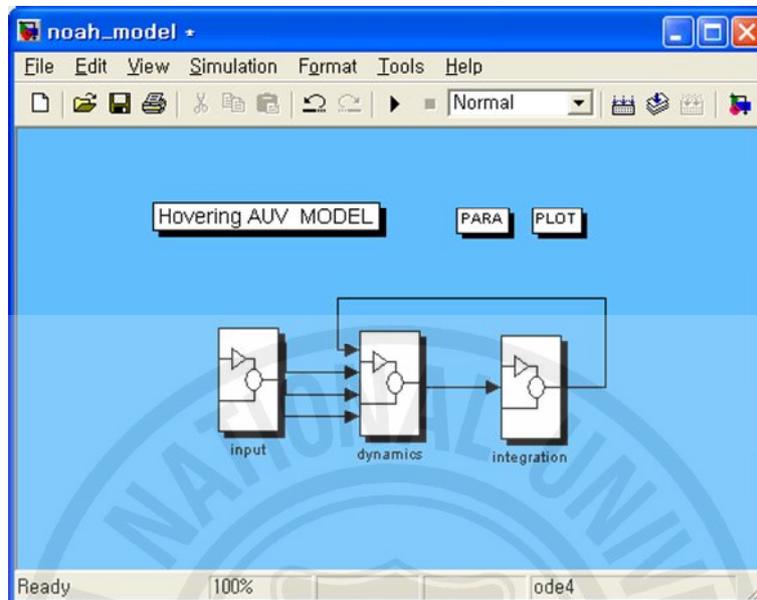


Fig. 25 NOAH simulation program using Simulink

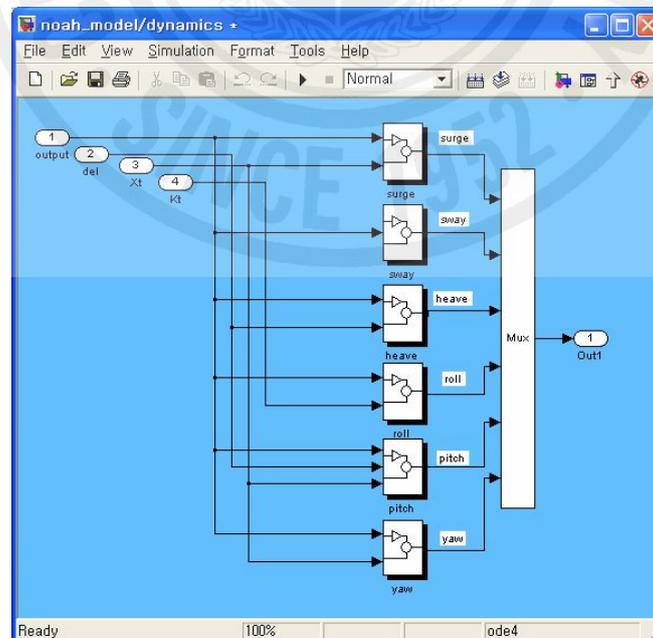


Fig. 26 NOAH dynamics blocks

앞에서 개발된 시뮬레이션 프로그램의 성능을 확인하기 위해 Fig. 27과 같이 잠수정이 오른쪽으로 회전하면서 잠수하는 나선형 운동의 시뮬레이션을 실시하였다.

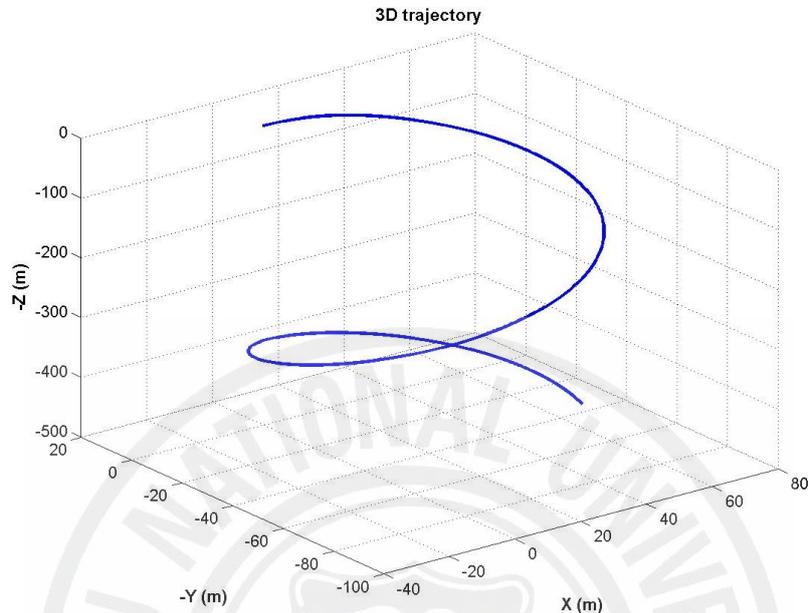


Fig. 27 Simulation of spiral trajectory

시뮬레이션에서 주어진 입력은 잠수정이 오른쪽으로 회전을 하면서 잠수하기 때문에 Fig. 28에서와 같이 왼쪽 추진기와 수직 추진기에 5V의 전압을 주고 오른쪽의 추진기에는 전압을 인가하지 않은 상태에서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 29는 시뮬레이션 동안 잠수정의 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)의 속도인 u , v , w 를 나타내고 있으며, Fig. 30은 잠수정의 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 회전 변위인 ϕ , θ , ψ 를 나타내고 있다. Fig. 31은 시간에 따른 X, Y, Z 축에 대한 잠수정의 변위를 보여주고 있으며, Fig. 32는 X, Y평면상에서 바라본 잠수정의 변위를 보여 주고 있다. 시뮬레이션 결과 Simulink 모델의 정량적인 타당성은 확인할 수 없으나 정성적인 특성은 확인할 수 있었고, 본 모델을 잠수정의 성능해석을 위한 모델로 사용할 뿐만 아니라 제어기 설계를 위한 모델과 제어기의 성능해석을 위한 실제 플랜트(True plant)로도 사용하고자 한다.

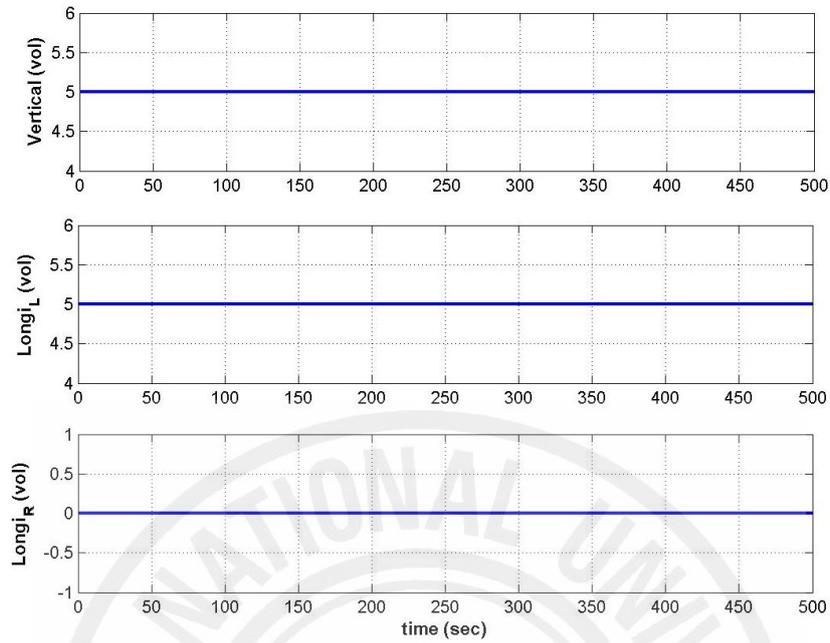


Fig. 28 Input voltages to thrusters

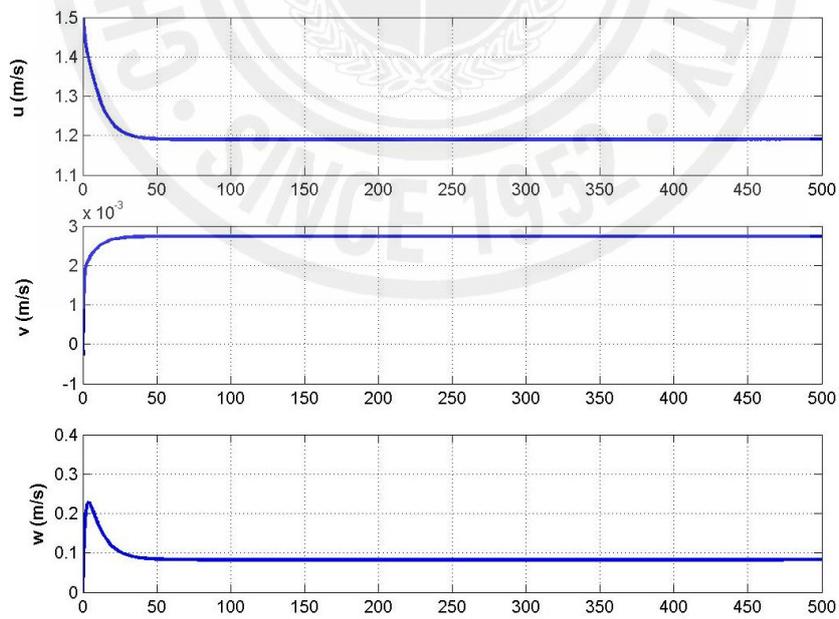


Fig. 29 Linear velocity in spiral simulation

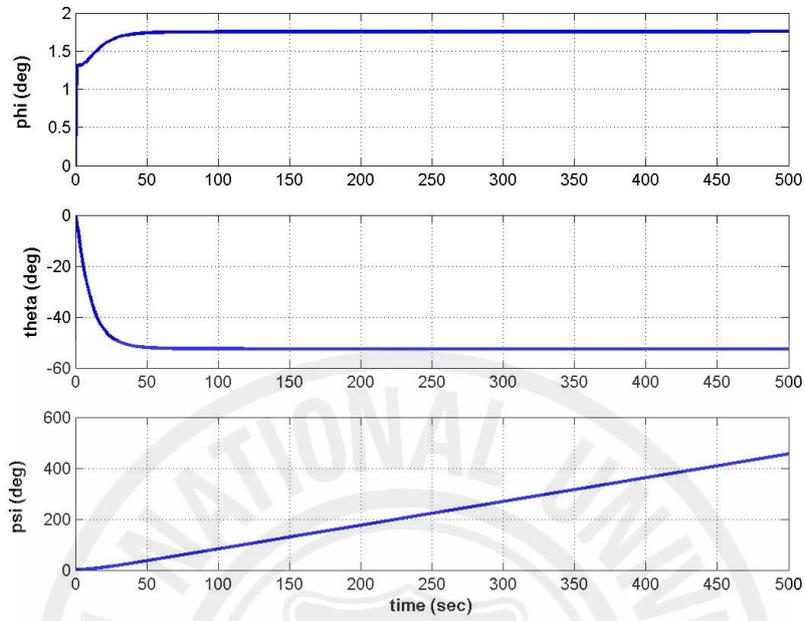


Fig. 30 Angular velocity in spiral simulation

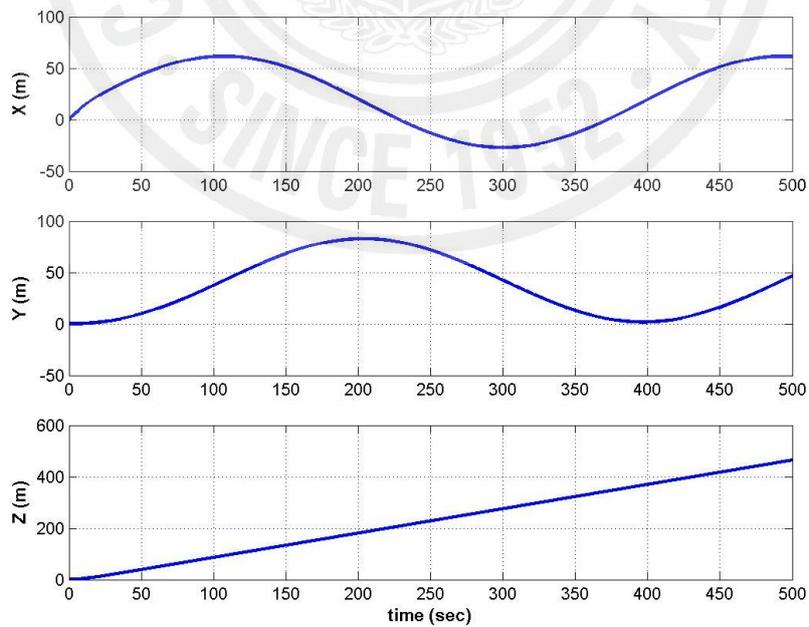


Fig. 31 Displacement of X, Y, Z axis in spiral simulation

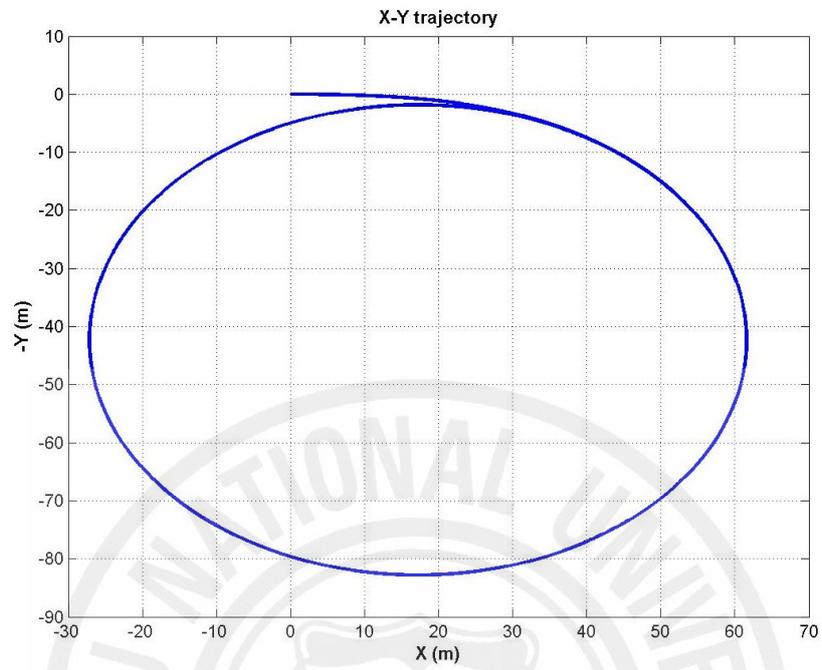


Fig. 32 Displacement of X-Y trajectory in spiral simulation

3.2 제어기 설계

무인잠수정은 해양의 열악한 환경에서 자율 주행하면서 임무를 완수하고 회귀해야 하기 때문에 불확실성에 대하여 강인한 제어시스템이 요구된다. 이러한 AUV의 제어를 위하여 고전적인 제어방법을 이용하는 경우에는 AUV의 운동특성을 정확히 파악하고 시스템의 모든 파라미터를 실험과 이론 계산으로 추정하여 모델링하는 것이 요구된다. AUV의 유체동역학 계수는 운항속도, 자세 등에 의해 동 특성이 변화되며, 조류의 영향에 의한 상대속도의 변화에 기인하는 양력변화 등이 시스템의 동 특성에 미치는 영향도 크다. 따라서 고전적인 제어방법은 시스템의 모델링이 정확히 이루어졌다 하더라도 운항상태 변화에 따른 제어 이득 값의 스케줄링이 필요하고 이의 강인성을 보장하기가 용이하지 않다.

최근 제어기술의 개발로 AUV의 위치와 자세를 성공적으로 제어하는 연구 결과들이 발표되고 있으며 대표적인 경우가 슬라이딩 모드 제어기와 퍼지 제어기 등이다. Yoerger와 Slotine은 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 ROV의 운동을 제어하였으며[15], Cristi등은 슬라이딩 모드 제어기로 AUV의 수직운동을 제어하였다[16]. Marco와 Healey는 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 속도, 수심 및 방향 제어를 수행하였고[22], Lee등은 이산슬라이딩 모드 제어기를 설계하고 이를 AUV에 적용하였다[17]. 또한 Lea등과 Smith등은 퍼지 제어기를 설계하였고 AUV의 수심 및 방향 제어에 적용하였다.

위에서 나열한 제어 기법은 제어 성능은 우수하나 실제 시스템에서의 적용이 상대적으로 어려워 본 논문에서는 NOAH의 자세 및 위치 제어를 위하여 Fig. 33과 같이 구조가 간단하고 구현이 용이하며, 제어이득 조정이 비교적 쉬운 PID 제어기를 적용하고자 한다.

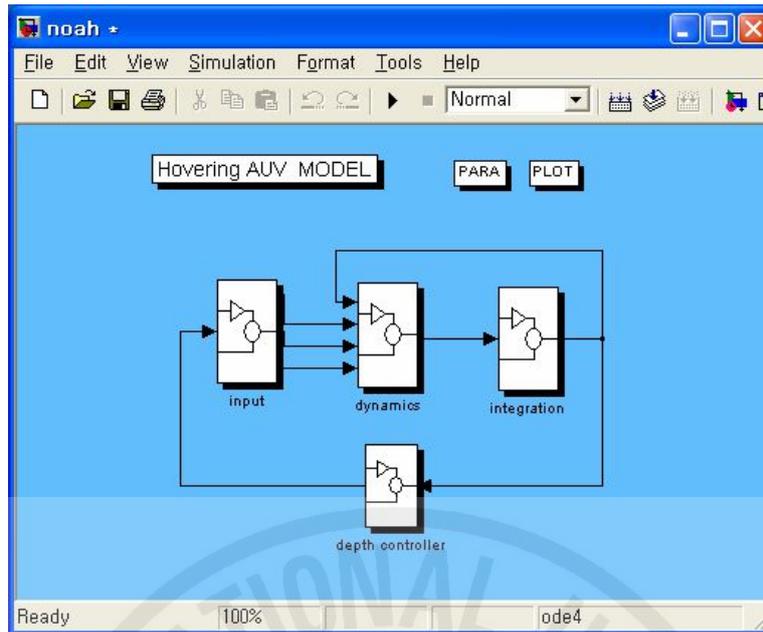


Fig. 33 Controller design for depth / heading control using Simulink

PID 제어는 비례-미분-적분(Proportional-Integral-Derivative, PID) 제어를 의미하며 단일 입출력 시스템에서 주로 사용되고 있다.

적분요소가 없는 플랜트에서 단순한 비례제어기를 사용한다면 일정한 입력에 대하여 정상상태 오차가 발생하게 된다. 이러한 정상상태 오차는 비례제어기에 적분제어기를 포함시킴으로써 제거할 수 있다. 플랜트 자체에 적분요소를 포함하고 있다 하더라도 일정한 외란이 존재하면 정상상태 오차가 발생하게 되는데 이때에도 비례제어기에 적분제어기를 포함시키면 정상상태 오차를 제거시킬 수 있다.

미분제어기는 오차신호의 변화율을 가지고 제어하므로 오차신호의 크기가 커지기 전에 제어할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 미분제어기는 초기에 큰 제어량이 요구되지만 시스템의 안정도를 증가시키는 경향이 있다. 또한 미분제어기는 정상상태 오차에 직접적으로 영향을 주지는 못하지만 시스템에 감쇠효과를 주기 때문에 시스템 이득을 증가시킬 수 있게 한다. 그 결과 미분제어기는 정상상태 오차를 줄일 수 있는 효과도 있다. 그러나 이것은 오차신호 자체에 대하여 동작하는 것이 아

니라 오차신호의 변화율에 대하여 동작하므로 미분제어기 만으로는 결코 사용할 수가 없다. 미분제어기는 항상 비례제어기 또는 비례-적분 제어기와 결합하여 사용해야 한다.

일반적인 PID 제어기의 구조는 다음과 같다.

$$u(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s)e(s) \quad (10)$$

여기서 K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득 그리고 K_d 는 미분 이득을 나타내며 이득 값 조절 시 Ziegler-Nichols 방법이 대표적으로 사용되고 있다.

3.2.1 수심제어

Matlab Simulink를 이용하여 설계된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 앞장에서 제시된 PID 제어기에 대한 수심제어 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 34는 Fig. 33에서 설계된 PID 제어기를 이용한 수심제어 시뮬레이션결과를 3차원 평면상에서 나타내고 있다. 시뮬레이션 조건은 목표수심이 최초 1m에서 60초 경과 후에 다시 수면으로 변하는 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 35에서 보면 NOAH는 수면에서 출발하여 목표수심 1m로 내려갔다가 60초 경과 후 다시 초기수심인 수면으로 돌아오는 것을 볼 수 있으며, 이 때 약 10초 정도의 시간이 흐른 뒤 목표수심인 수심 1m로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서는 외란의 영향이 거의 없는 상황에 대해서 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 진동 없이 빠르게 원하는 목표수심으로 수렴해 나가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 36은 X-Y 평면에서의 수심제어 시뮬레이션 결과이고, Fig. 37은 시뮬레이션 과정 동안의 X, Y, Z 축에 대한 잠수정의 변위를 나타내고 있다. Fig. 38은 시뮬레이션 동안 잠수정의 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)의 속도인 u, v, w 를 나타내고 있으며, Fig. 39는 잠수정의 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 회전 변위인 ϕ, θ, ψ 를 나타내고 있다.

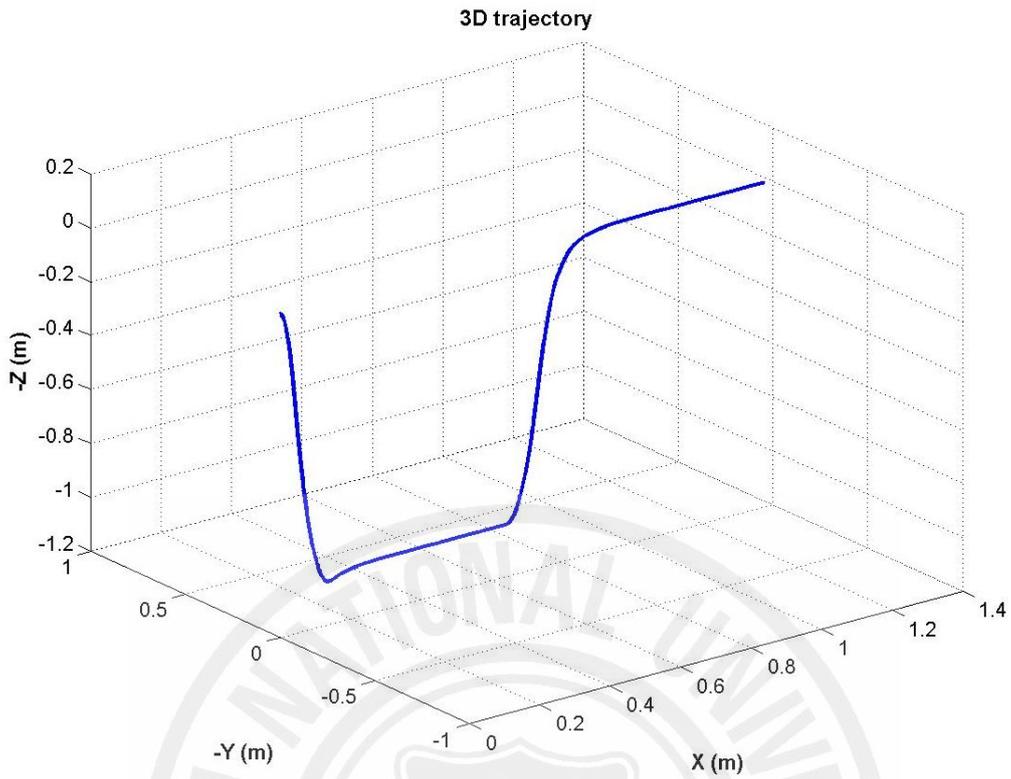


Fig. 34 Simulation result of depth control in 3D trajectory

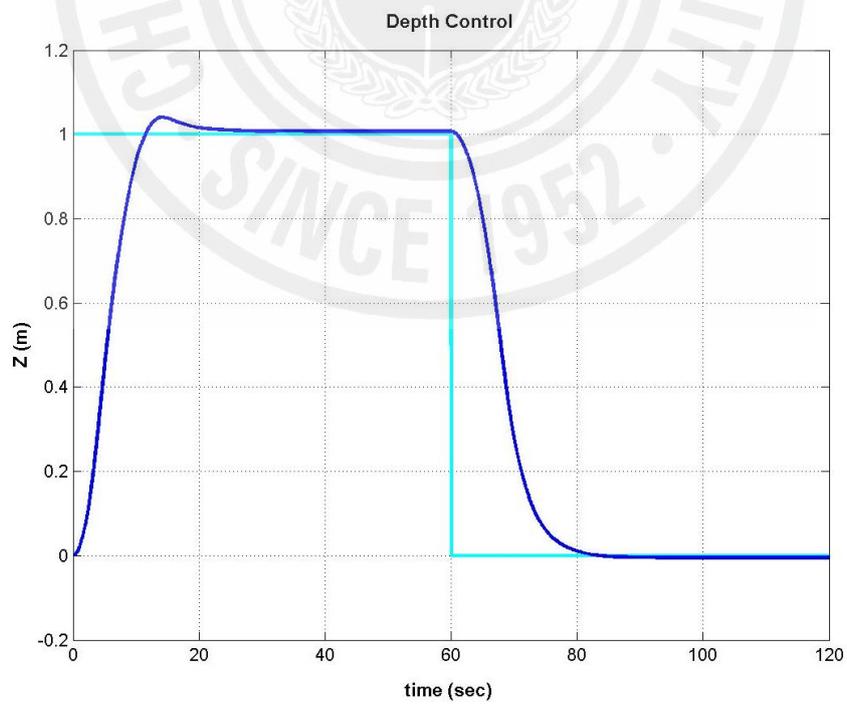


Fig. 35 Depth control simulation result Z plane

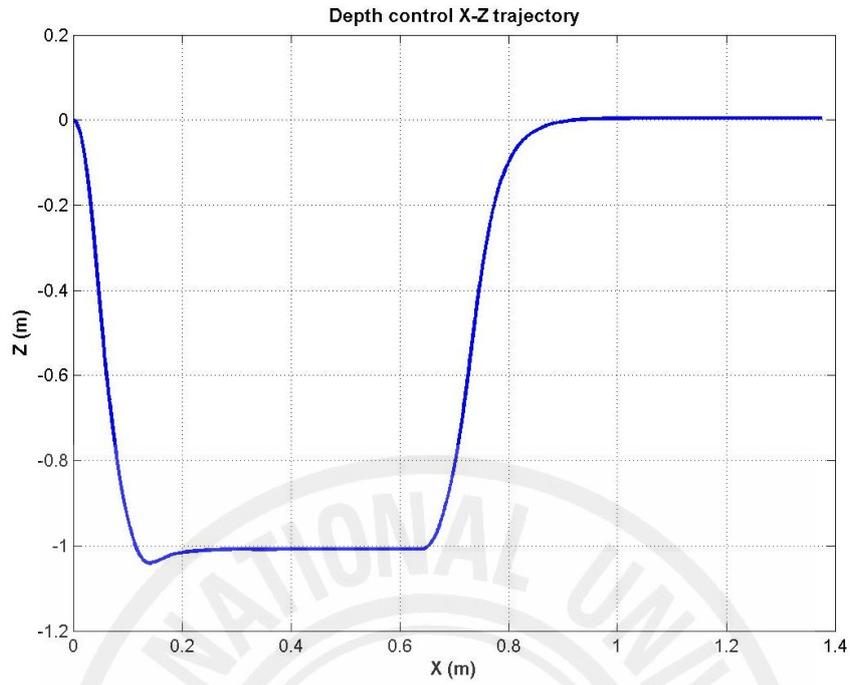


Fig. 36 Depth control simulation result X-Z trajectory

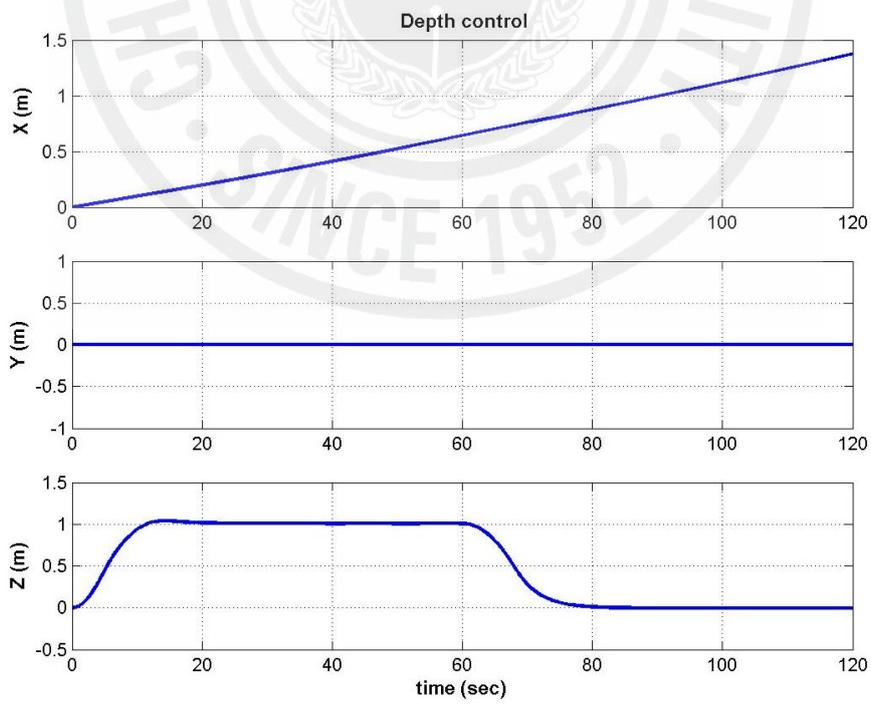


Fig. 37 X, Y, Z displacement in depth control simulation

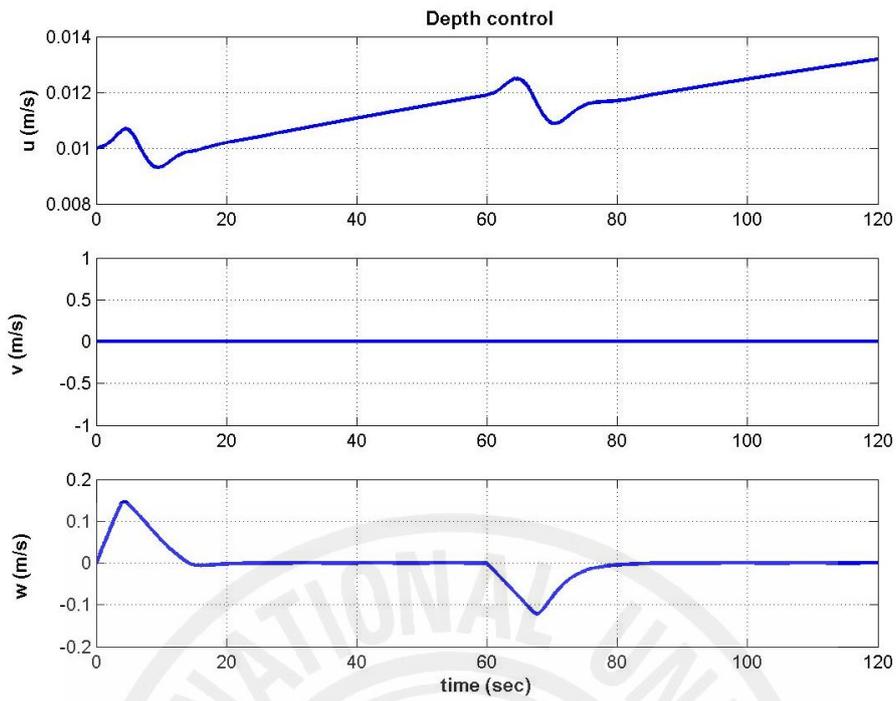


Fig. 38 Linear velocity in depth control simulation

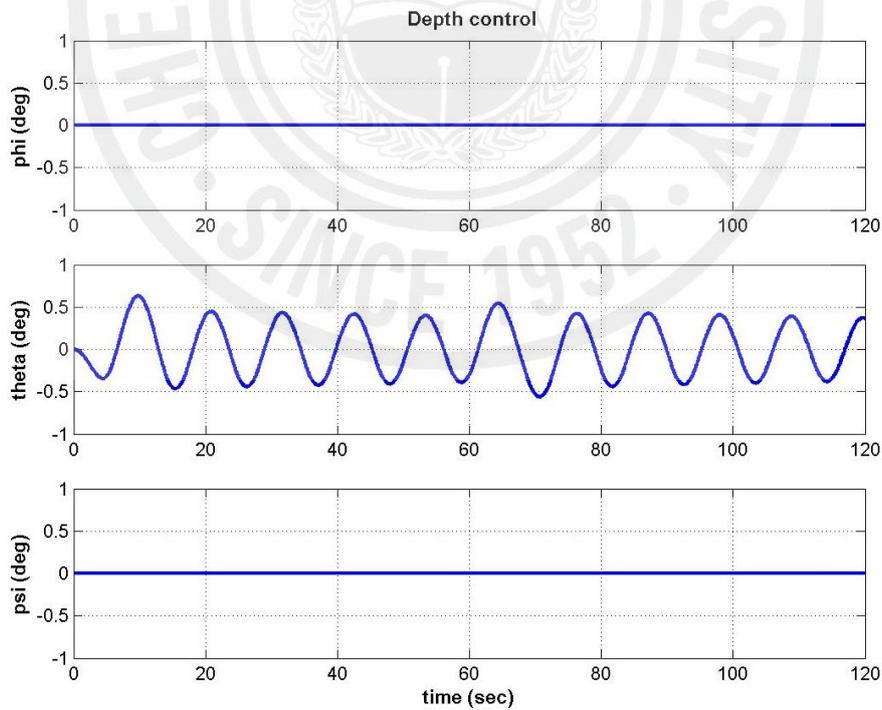


Fig. 39 Angular velocity in depth control simulation

3.2.2 방향각제어

Fig. 40은 수심제어와 동일한 PID 제어기를 사용하여 방향각 변화에 대해 실시한 시뮬레이션 결과를 3차원 평면상에서 보여주고 있는데, 이때 수심은 일정하게 유지되고 있다. 시뮬레이션 조건은 목표각이 NOAH의 진행방향에서 오른쪽으로 90° 에서 100초 후에 0° 가 되도록 하였으며, 이 때 잠수정의 진행 속도는 0.1m/s로 하였다.

Fig. 41은 시간에 대한 방향각 변화를 보여주고 있는데, 100초 경과 후에 목표각이 90° 에서 0° 로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 방향각 제어에 대한 시뮬레이션 결과 역시 수심제어 시뮬레이션과 마찬가지로 외란의 영향이 거의 없는 상황으로 가정을 하였기 때문에 진동이 발생하지 않고 목표 각을 따라가는 것을 보여주고 있다. Fig. 42는 X-Y평면에서의 방향각제어 시뮬레이션 결과이며, 방향각을 변화시키는 동안 오른쪽으로 약 10m정도 이동하는 모습을 나타내고 있다. Fig. 43은 X, Y, Z 방향의 변위를 나타내고 있는데, Fig. 40에서 보는 것처럼 수심방향에 대한 변위는 아주 미세함을 알 수 있다. Fig. 44는 시뮬레이션 동안 잠수정의 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)의 속도인 u , v , w 를 나타내고 있으며, Fig. 45는 잠수정의 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 회전 변위인 ϕ , θ , ψ 를 나타내고 있다.

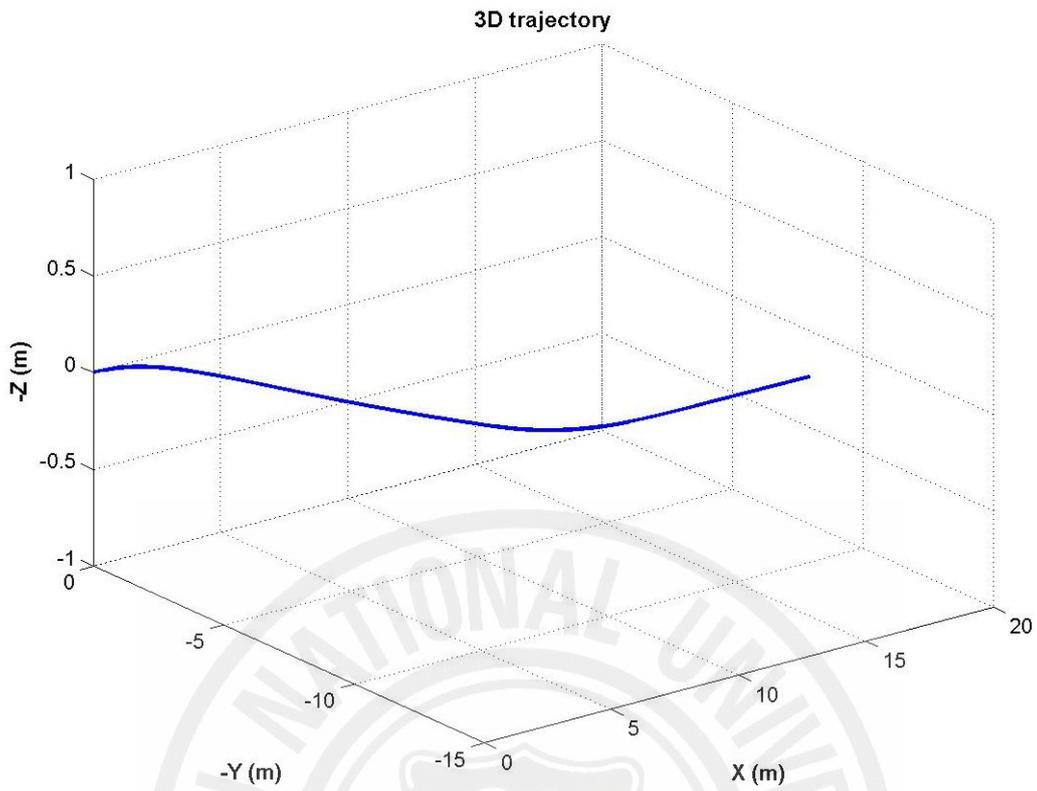


Fig. 40 Simulation result of heading control in 3D trajectory

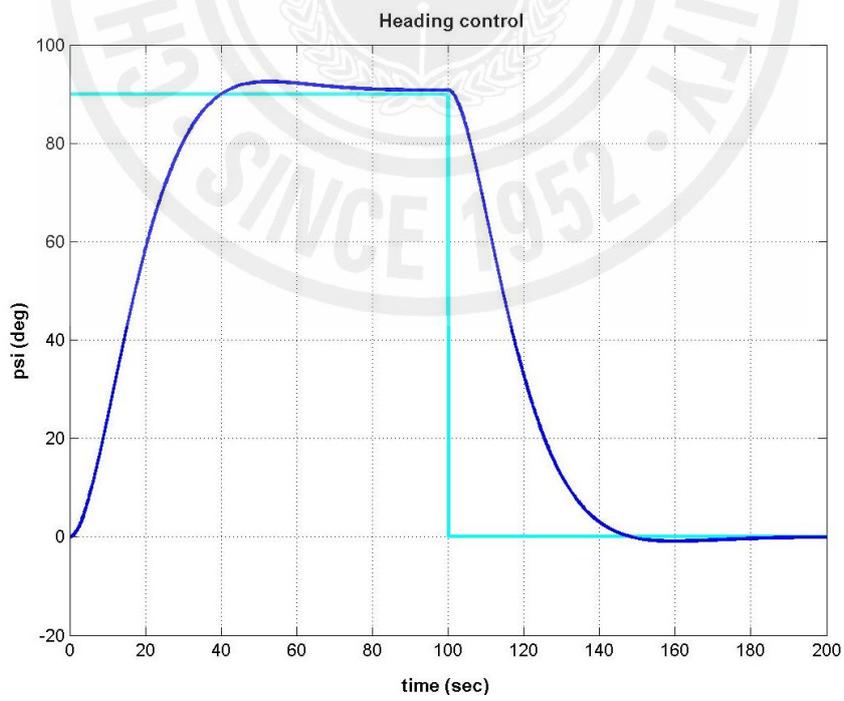


Fig. 41 Yaw angle in heading control simulation

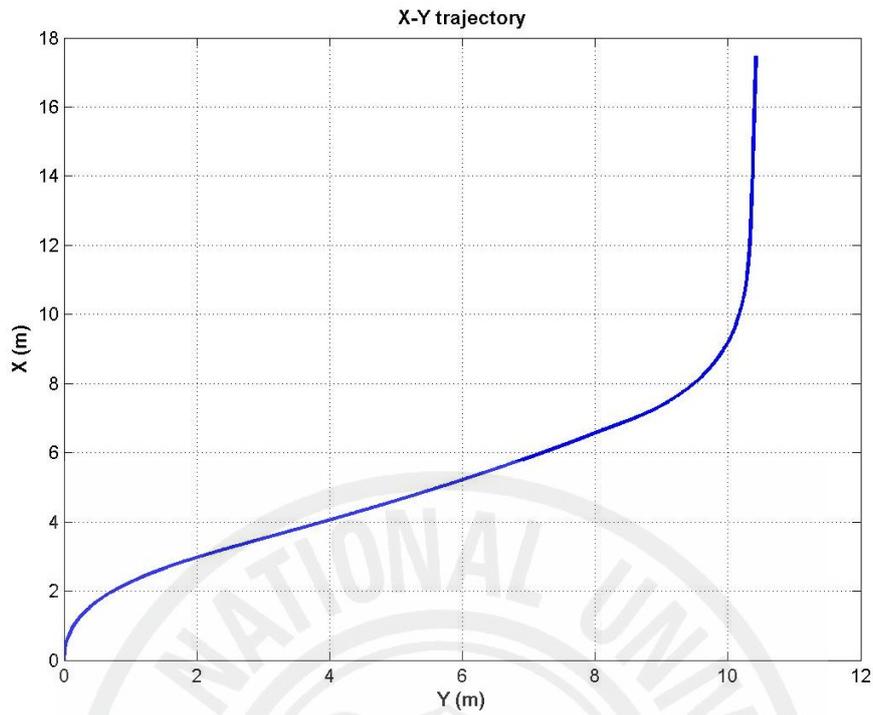


Fig. 42 Heading control simulation result in X-Y trajectory

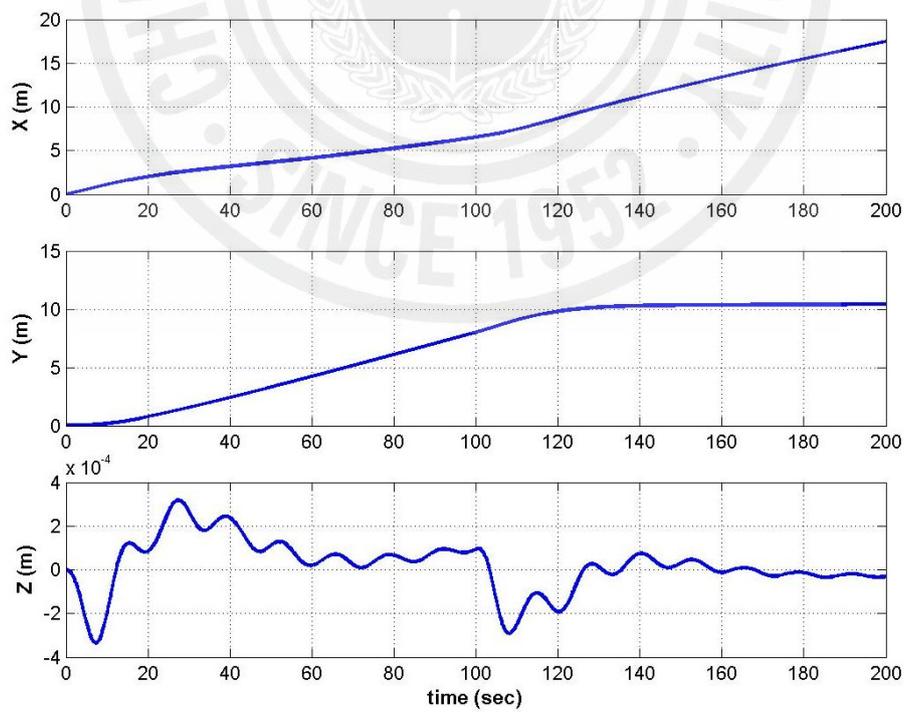


Fig. 43 X, Y, Z displacement in heading control simulation

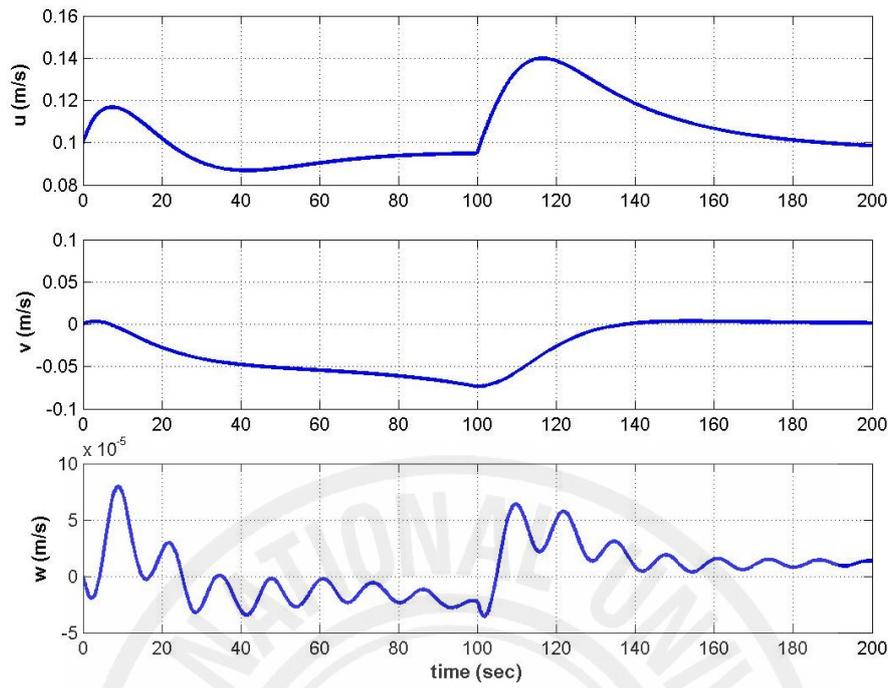


Fig. 44 Linear velocity in heading control simulation

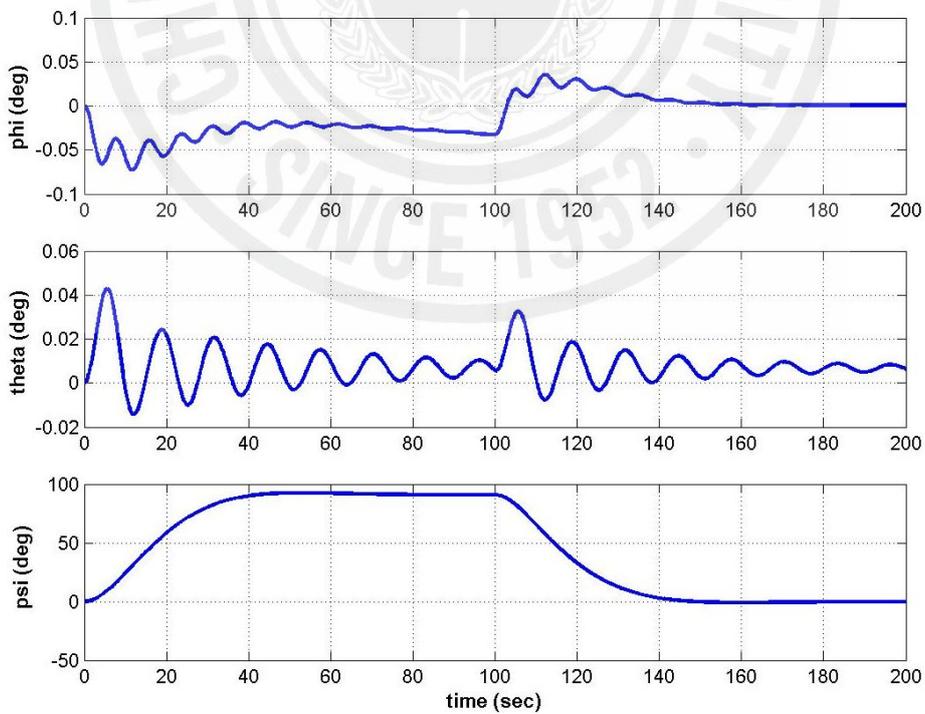


Fig. 45 Angular velocity in heading control simulation

4. 수조실험

NOAH의 성능실험을 수행하기 위하여 수조실험을 수행하였다. 수조실험은 본 실험실에서 보유하고 있는 수조와 부설 연구소인 해양과 환경연구소의 해수수조에 실시하였다. 수조실험을 위해서 우선적으로 NOAH의 트림과 중성부력을 맞추었다. NOAH의 무게에는 추후 장착될 장비의 무게만큼의 유료하중(payload)이 30kg정도 있기 때문에 중성부력을 맞춰주기 위해 납을 선체에 장착하였다. Fig. 46은 실험실 내의 1.2m×1m×1m의 소형수조에서 부력과 트림조정을 위한 실험 모습을 보여주고 있다.



Fig. 46 Buoyancy and trim test of NOAH

4.1 수심제어 실험

설계된 PID 제어기의 성능을 검증하기 위한 수심제어 실험을 실시하였다. 수심 제어 실험은 Fig. 47의 2m×1.2m×1.5m의 수조와 해양과 환경 연구소에 있는 Fig. 48의 3.5m×2m×2m의 해수수조에서 수행하였다. 실험은 목표수심이 하나인 경우와 두 개인 경우에 대해 실행하였으며, 시간은 0 ~ 60초까지 측정을 하였고 각각의 경우 시뮬레이션과 실제 실험 모두 목표수심을 잘 따라가는지 비교하였다.



Fig. 47 Depth control test in basin



Fig. 48 Depth control test in sea water basin

Fig. 49와 50은 목표 수심(Desired depth)이 0.7m인 경우에 대한 실험 결과이며, Fig. 49에서 보는 바와 같이 압력센서에 의해 얻어진 수심이 진동을 하고 있지만 원하는 수심을 잘 따라가고 있는 것을 볼 수 있다. 압력센서의 잡음(Noise)을 줄이기 위해 FIR(Finite Impulse Response) 필터 알고리즘을 적용한 뒤 잡음 성분을 제거하고 그래프로 나타내었다. Fig. 49는 압력센서에서 얻은 신호와 FIR 필터를 통과한 신호를 동시에 나타내고 있으며, Fig. 50은 3장에서 얻은 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 동시에 나타내고 있는데 두 경우 모두 목표수심을 따라가려는 경향을 보이고 있다.

Fig. 51과 52는 목표 수심이 초기에 0.7m에서 30초 경과 후 1m로 변하는 경우에 대해 실험을 수행한 결과이다. 이 경우 역시 NOAH가 두 개의 목표수심을 진동하면서 추종함을 볼 수 있었으며, 압력센서에서 측정되는 값에 잡음(Noise)이 발생하여 FIR 필터를 적용하여 저주파를 통과하도록 하였다. Fig. 52에서는 필터를 통과한 결과와 시뮬레이션 결과가 목표수심을 잘 따라가고 있음을 보여주고 있다.

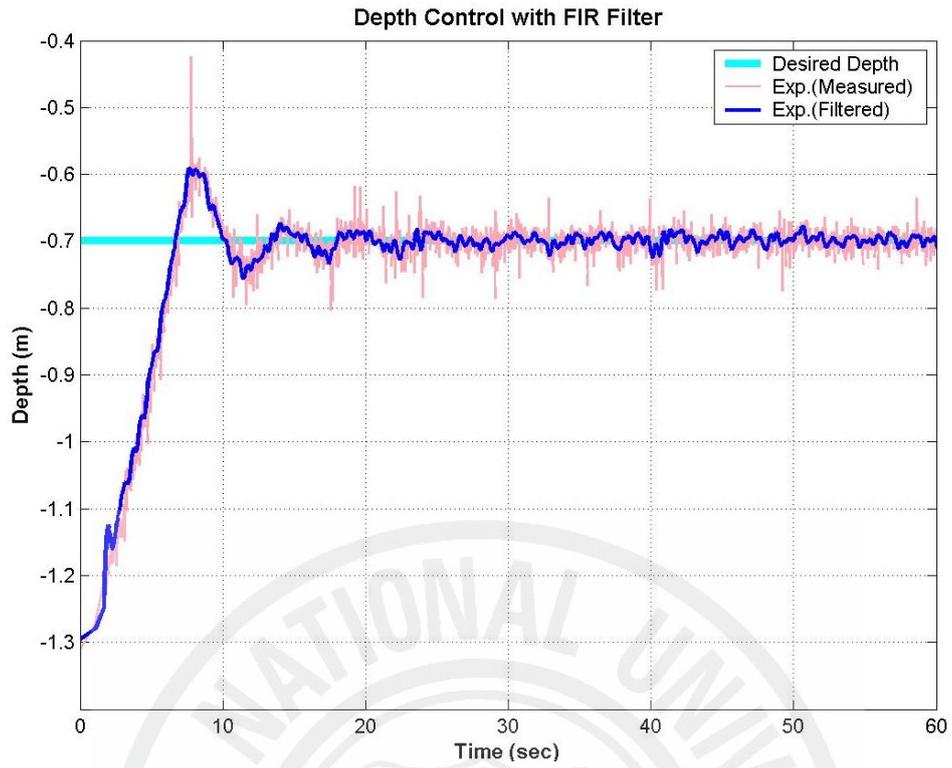


Fig. 49 Depth control with FIR filter

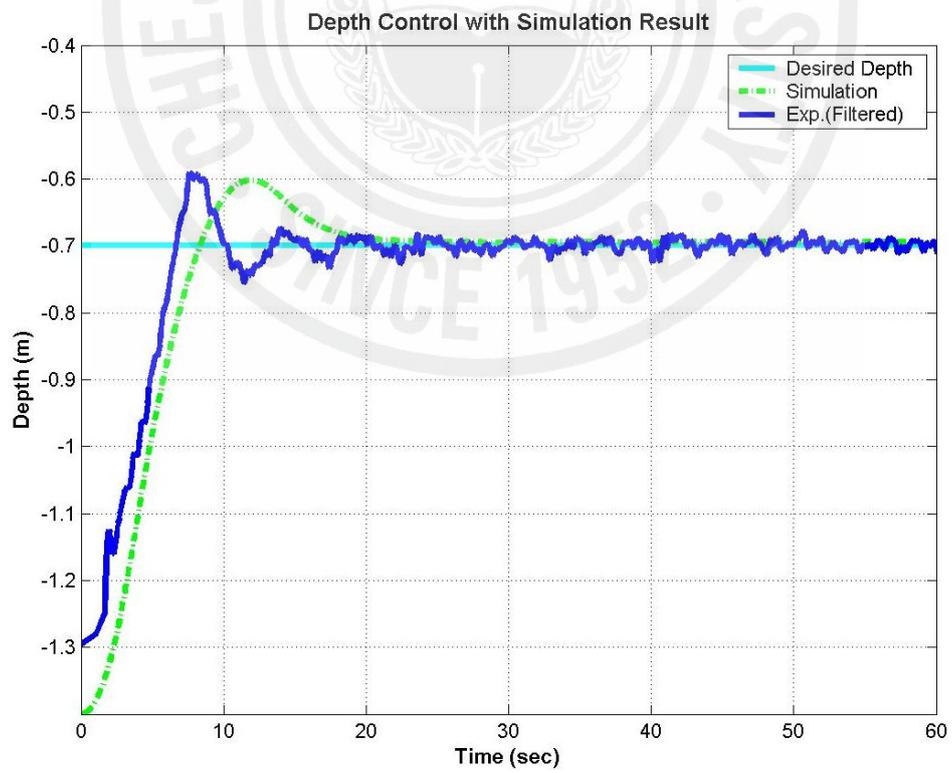


Fig. 50 Depth control with simulation result

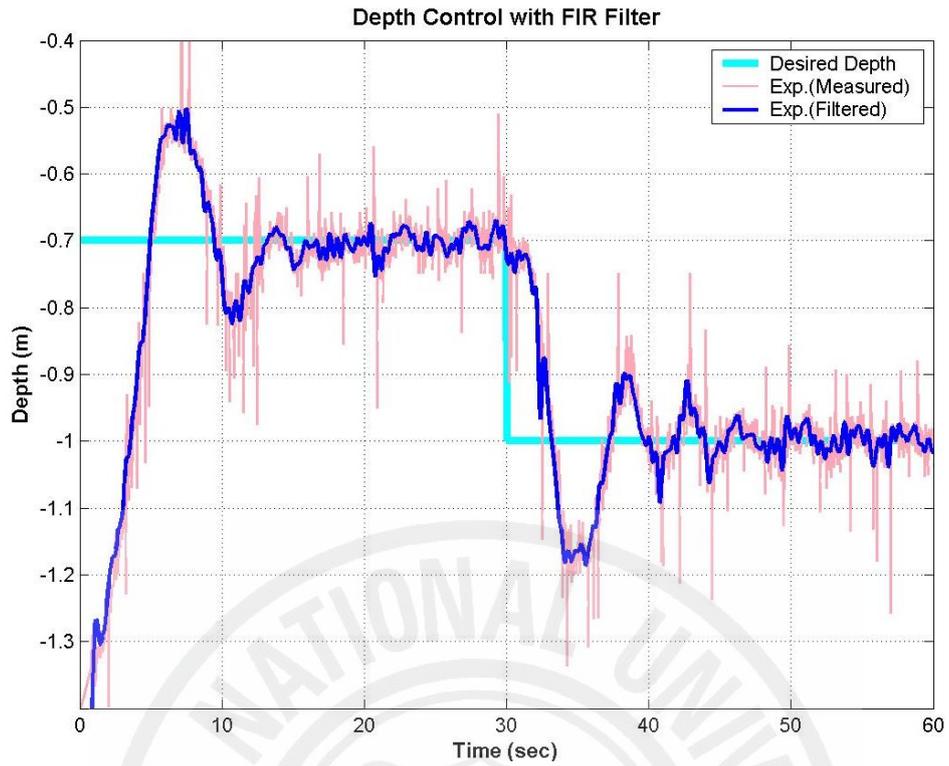


Fig. 51 Depth control with FIR filter (2)

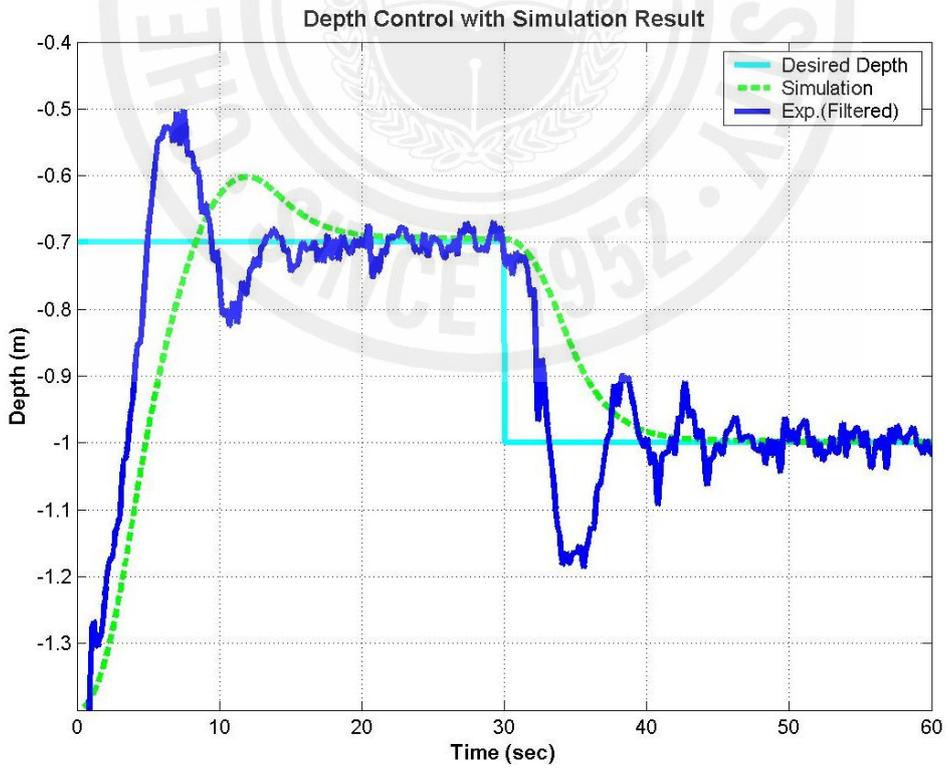


Fig. 52 Depth control with simulation result (2)

5. 결론

본 논문에서는 Hovering AUV NOAH의 설계 및 제작과정에 대해 기술하였으며, 모델링을 통한 운동성능을 해석하고, 설계된 제어기를 이용하여 수조실험을 실시하였다. 본 연구에서 제작한 무인잠수정 NOAH는 수중에서 탐사를 위한 용도로 사용되는 Hovering AUV로 자신의 자세와 위치를 유지하고 원하는 자세를 유지하고 목표 위치로 정확히 이동할 수 있는 능력이 중요한 설계목표가 된다. 제작된 NOAH는 이러한 기능을 실현하고 성능을 더욱 향상시키기 위해 구동장치 및 계측장치를 테스트하기 위한 Test-bed로써의 기능을 수행하게 될 것이다. 추진기는 4자유도의 운동을 제어할 수 있도록 주 추진기 2개, 수평추진기 1개와 수직추진기 1개를 장착하였다. 자세와 위치를 제어하고 운항을 제어할 센서로는 압력계와 자력컴퍼스를 사용하고 있다. NOAH의 모든 센서와 추진기를 실시간으로 제어하고 모니터링 할 뿐만 아니라 전체시스템을 운용하기 위하여 소형 On-board PC를 사용하고 있으며, 운용시스템은 Microsoft사의 Windows XP를 사용한다. 또한, 모든 운용프로그램은 외부의 Master PC로부터 Ethernet을 이용한 TCP/IP통신을 이용해 다운받는 방식을 사용한다.

설계된 NOAH의 운동성능을 해석하기 위하여 6자유도 운동방정식을 전개하였고, 전개된 운동방정식을 이용하여 Matlab / Simulink를 이용한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 또한, NOAH의 자세 및 위치 제어를 위해 PID 제어기를 설계하였고 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 제어기 성능을 해석하고 수조에서 수심제어 실험을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 수심제어에 대한 수조실험에서는 목표 수심을 추종하는데 진동이 발생하기는 하나 빠르게 따라가는 것을 볼 수 있었다.

향후 보완되어야 할 연구로는 자력컴퍼스를 이용한 방향제어 실험을 수행하여 NOAH의 Hovering 기능을 높이고, 구동장치와 계측장치의 성능 및 제어알고리즘을 개선하는 것이다. 특히, 현재 사용된 PID 제어기는 외란에 대한 영향을 많이 받으므

로 외란에 강인한 성능을 보이는 비선형 제어기인 슬라이딩모드 제어기와 적응제어기의 적용도 필요할 것으로 생각된다. 또한, 위치측정시스템을 탑재하여 위치제어를 수행하여 수중작업과 탐사를 위한 Hovering AUV의 기능을 완성하고자 한다.



참고문헌

- [1] J. Yuh , *Underwater Robotic Vehicle: Design and Control*, TSI Press Series, 1995.
- [2] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [3] M. Gertler, G. R. Hagen, “Standard Equation of Motion for Submarine Simulations,” NSRDC Report No. 2510, 1967.
- [4] J. Feldman, “DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion,” DTNSRDC/SPD-0393-09, 1979.
- [5] A. J. Healey, D. Lienard, “Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering* Vol. 18, No. 3, 1993.
- [6] D. B. Marco, A. J. Healey, “Command, Control, and Navigation Experimental Results with the NPS ARIES AUV,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, 2001.
- [7] J. Yuh, “Learning Control for Underwater Robotic Vehicles,” *IEEE Control System Magazine*, Vol. 14, Issue 2, pp. 39-46, April 1994.
- [8] Side Zhao, J. Yuh, “Experimental Study on Advanced Underwater Robot Control,” *Robotics*, *IEEE Transactions* Vol. 21, Issue 4, pp. 695-703, Aug. 2005.
- [9] Feijun Song, P. Edgar An, Andres Folleco, “Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Vehicle: Design and Implementation,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.28, No.2, pp.283-296, April. 2003.
- [10] S. Desset, R. Damus, F. Hover, J. Morash, V. Polidoro, “Closer to Deep Underwater Science with ODYSSEY IV Class Hovering Autonomous Underwater Vehicle(HAUV),” *Oceans 2005-Europe*, Vol.2, 20-23, pp.758-762, June 2005.
- [11] J. Yuh, “Development in Underwater Robotics,” *Robotics and Automation*, 1995

- Proceedings, 1995 IEEE International Conference, Vol. 2, 21–27, pp. 1862-1867, May 1995.
- [12] T. I. Fossen, “Underwater Robotic Vehicle Dynamics,” Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994.
- [13] Hang S. Choi, Pan M. Lee, Seok W. Hong and Sup Hong, “Current Researches on Underwater Robotics in Korea,” Proceedings of the 2002 International Symposium, pp.205-210, 2002. 4. 16–19.
- [14] C. von Alt, B. Allen, T. Austin, N. Forrester, R. Goldsborough, M. Purcell, R. Stokey, “Hunting for mines with REMUS : a high performance, affordable, free swimming underwater robot,” Oceans 2001, MTS/IEEE Conference and Exhibition, Vol. 1, 5–8, pp.117–122, Nov. 2001.
- [15] Joonyoung Kim, Kihun Kim, Hang S. Choi, Woojae Seong, Kyu-Yeul Lee, “Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 830–840, 2002.
- [16] D. R. Yoerger, J. J. E. Slotine, “Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 462–470, 1985.
- [17] R. Cristi, F. A. Papoulias, A. J. Healey, “Adaptive Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicles in the Dive Plane,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 152–160, 1990.
- [18] P. M. Lee, S. W. Hong, Y. K. lim, C. M. Lee, B. H. Jeon, J. W. Park, “Discrete-Time Quasi-Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 388–395, 1999.
- [19] Kadir Akyol, “Hardware Integration of the Small Autonomous Underwater Vehicle Navigation System (SANS) Using a PC/104 Computer,” Naval Postgraduate School, Master’ s Thesis, 1999. 3.

- [20] 신민섭, “위치측정이 가능한 선박 검사용 ROV의 개발,” 서울대학교 조선해양공학과 석사학위논문, 2004. 8.
- [21] 김기훈, “무인잠수정 SNUUV 1의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석,” 서울대학교 조선해양공학과 박사학위논문, 2005. 2.
- [22] 홍도천, 이판목, 홍석원, 이종식, 이종무, 공도식, 손영수, 최학선, 현범수, “무인잠수정(ROV)의 설계 및 개발,” 한국해양공학회지 제7권 제1호, pp. 62-72, 1993. 6.
- [23] 이판목, 전봉환, 정성욱, “자율무인잠수정(AUV)의 모의 실험을 위한 테스트 베드의 개발-하드웨어와 소프트웨어,” 한국해양공학회지 제11권 제1호, pp. 106-112, 1997.2.
- [24] 전봉환, 이판목, 이계홍, 홍석원, 이지홍, “네 대의 주 추진기를 이용한 무인 잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어 시뮬레이션 및 실험,” 한국해양공학회지 제19권 제2호, pp. 67-73, 2005.
- [25] 전봉환, 이판목, 임용곤, 홍석원, “무인잠수정의 통합시뮬레이션 환경 개발,” 제3회 해상무기체계발전세미나 논문집, pp 81-87. 2000.
- [26] 이판목, 이종무, 전봉환, 최현택, 이계홍, 김기훈, 류승철, 홍석원, 임용곤, 박종원, 조성권, 김덕진, 구범모, 정희섭, 박철수, 윤석준, 서영우, “심해 무인잠수정 해미래의 동해 및 태평양 실험역 실험,” 수중로봇기술연구회 2006 추계 워크샵, pp. 9-16, 2006.
- [27] 최영수, 정경민, 이성욱, 정승호, “원전 감시점검을 위한 수중로봇 기술,” 수중로봇기술연구회 2006 추계워크샵, pp. 23-27, 2006.
- [28] 변승우, 구태희, 김병엽, 김준영, “Hovering AUV ‘NOAH’의 설계 및 제어 실험,” 수중로봇기술연구회 2006 추계워크샵, pp. 28-33, 2006.
- [29] Thruster specification retrieved July 3, 2006 from <http://www.tecnadyne.com/thrusters.htm>

[30] PC104 CPU module specification retrieved May 3, 2006 from

<http://emea.kontron.com/index.php?id=226&cat=54&productid=43>

[31] Magnetic compass specification retrieved May 20, 2006 from

<http://www.pnicorp.com/supportProduct?nodeId=c4b2>

[32] AD/DA board and DC/DC converter specification retrieved September 10, 2006 from

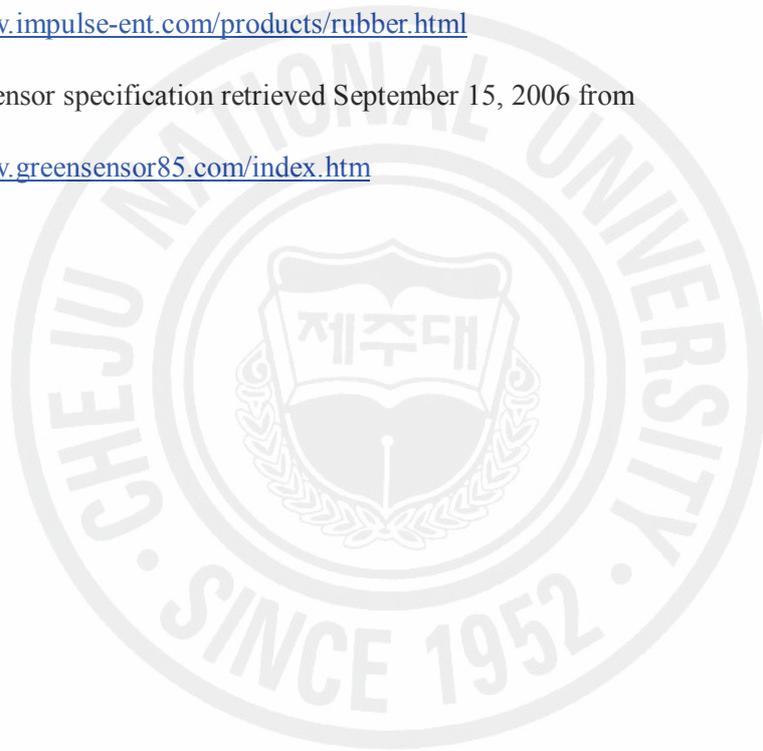
<http://www.diamondsystems.com/products/>

[33] Connector specification retrieved September 2, 2006 from

<http://www.impulse-ent.com/products/rubber.html>

[34] Pressure sensor specification retrieved September 15, 2006 from

<http://www.greensensor85.com/index.htm>



Appendix

A. 추진력 계산

NOAH의 최고 속도에서 요구되는 항력을 추정하고, 이를 바탕으로 추력을 산정하였다. 이때 선체 형상에 따른 항력계수는 NOAH의 형상을 고려하여 세 부분으로 나누어 계산을 하였다.

$$\text{Maximum velocity} = 1.8\text{m/s}$$

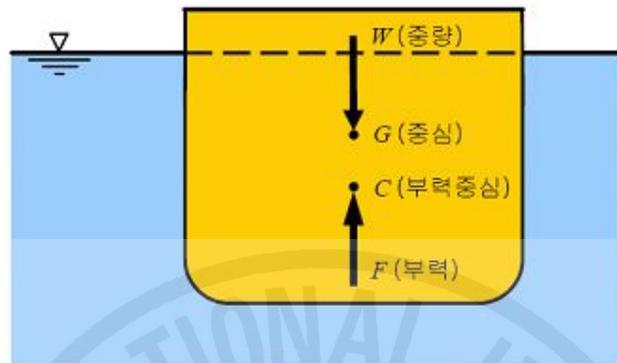
$$\text{Thrust} = \text{Drag} = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 = 354\text{N}$$

$$\text{Thrust power} = \text{Thrust} \times v = 354 \times 1.8 = 637\text{ W}$$

위의 계산 결과에 따르면 최고속도 1.8m/s를 구현하기 위한 추진기의 추력은 637W 이다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 Tecnadyne사의 BLDC(Brushless DC) 추진기 Model 300을 주행용 추진기로 선택하였다. Model 300의 추력은 350W인데 좌·우에 2개를 장착함으로써 요구되는 추력을 만족시키면서 여유분을 두었다. 수직과 수평방향 추진기는 Model 280을 사용하였으며, 추력은 300W이다. Model 280은 전진과 후진 시 5.4kg의 동일한 추력을 갖는다. Tecnadyne사의 추진기는 모터와 드라이버가 일체형으로 이루어져 있으며 수밀 구조로 되어있다. 또한, 케이블과 커넥터가 함께 제공되어 기술적인 어려움을 줄일 수 있었다.

B. 부력 계산

부력의 크기는 물체가 배제하는 물의 중량과 같으며, 물체의 침수 부분 용적의 중심(부심)에서 위쪽으로 작용한다



물에서 뜨려고 하는 성질을 양성부력이라 하고 가라앉으려는 성질을 음성부력, 물과 비중이 비슷하여 뜨지도 가라앉지도 않는 상태를 중성부력이라 한다.

$$\text{부력} = \text{비중량} \times \text{물에 잠긴 체적}$$

$$\text{비중량} = \text{밀도} \times \text{중력가속도}$$

$$\text{중량} = \text{질량} \times \text{중력가속도}$$

우선 각 파트 별 부피를 m단위로 계산하면 각각의 부피는 부력체는 0.041m^3 , 프레임 0.003m^3 , 압력용기는 0.035m^3 이다. 각각의 부피의 합에 물의 비중을 곱하면 잠수정의 부력을 알 수 있다.

$$\text{잠수정의 부력} = 0.079(\text{m}^3) \times 1000(\text{kg}/\text{m}^3) = 79.00(\text{kgf})$$

중량은 잠수정을 저울에 올려놓고 측정한 값이 된다.

$$\text{부력과 중량의 합} = 79.00(\text{kgf}) + (-45)(\text{kgf}) = 34(\text{kgf})$$

따라서 NOAH는 34kgf 의 양성부력 상태임을 알 수 있다.

감사의 글

2005년 3월 군 전역과 동시에 대학원진학이라는 목표를 가지고 전역 이틀 후부터 연구실에 나와 지금까지, 2년 가까운 시간 동안 힘든 일도 많았고 즐거운 일도 많았습니다. 부족하나마 그 동안 연구한 내용을 가지고 논문을 쓴다는 사실이 대견스럽고, 저에게 이 논문은 끝이 아닌 새로운 시작을 의미하고 있습니다.

지난 2년 동안 부족한 저에게 많은 것을 가르쳐 주셨고, 수중로봇이라는 낯선 학문분야에 대해 흥미를 느끼게 해주신 김준영교수님께 다시 한번 머리 숙여 감사드립니다. 학부 때부터 열정적인 강의를 해주신 조일형 교수님, 석사과정 동안 많은 가르침을 주신 배진호교수님, 항상 대학원생들 생각해주시는 팽동국교수님, 이종현교수님께, 그리고 지금은 학교에 안 계시지만 학부 때부터 많은 것을 가르쳐주셨던 강창익교수님, 실험에 도움을 주신 안장영, 김석종교수님께도 진심으로 감사드립니다.

처음 대학원 생활을 시작하면서 해매던 저에게 많은 도움을 준 해양정보시스템 공학과 대학원 1기생 민정, 잉, 레디, 아닐 에게 고마움을 전합니다. 저와 연구실 생활을 같이 하면서 힘들었을 혁준이형, 태훈이형, 프로그래밍 교수 관석이형, 연구실 정신적 지주 남권호선생님, 저의 논문 준비를 도와주며 힘들었을 태희, 앞으로 대학원 진학할 정희, 정훈에게도 고마움과 함께 앞으로 열심히 하길 바랍니다. 그리고 항상 커피한잔과 따뜻한 조언을 해주신 김병엽박사님께도 감사의 말을 전합니다. 대학원 생활하는 동안 같이 고생한 영식이형, 병기형, 경범이, 과사무실 지연누나, 또, 같은 목표를 가지고 신나게 공부했던 고희전 선생님과 AraToefler 식구들 현경누나, 경보형, 성현이형, 철영이형, 은영이 모두들 원하는 일 꼭 이루길 바랍니다. 대학생활 동안 학교 생활하는데 활력소가 되었던 HLOHAK 선후배 및 동기들과 잊지 못할 추억들을 함께한 ROTC 동기 및 선후배들에게도 감사의 말을 드립니다.

그리고 변함없이 옆에서 힘이 되어주는 친구들 석, 은경, 규상, 수정, 정환, 상혁, 지훈, 승윤, 승훈, 태일, 은희, 제임스, 맵균, 보람, 정수&은정, 동기, 승룡&은경, 승필이와 RERA 멤버들, 15년 이라는 시간이 지나는 동안 같이 해준 창훈, 원근, 현아, 일선, 헤미누나, 친형 같은 정훈이형, 민건이형에게도 고마움을 전합니다.

15년 동안 변함없이 제게 힘이 되어주시고 항상 옆에서 따뜻하게 대해 주시는 인성스님, 창선이형과 우리절 식구들께도 감사 드립니다.

또한, 연구과정에서 많은 도움을 주신 해양연구원의 전봉환박사님, 김기훈박사님, 서울대 서동철, 황아름, 포항공대 한종희, 해양대 김경기에게도 감사 드립니다. 감사를 드려야 할 분들이 너무나 많은데 그분들을 감사의 글에 일일이 호명하지 못해서 죄송합니다.

끝으로 지금까지 키워주시면서 맘 고생 많이 하신 아버지, 지금은 어디선가 절 지켜보고 계실 어머니, 하나뿐인 동생 지향이, 옆에서 항상 응원해주시는 가족과

외할머니, 외삼촌, 이모들에게 감사하다는 말을 하고 싶습니다. 그리고 대학원 기간 동안 투정 한번 부리지 않고 항상 옆에서 힘이 되 준 사랑하는 현숙이와 부모님에게도 감사 드립니다.

어머니 영정에 이 논문을 바칩니다.

밑바닥에서 우뚝 서기

나는 네가

인생의 가장 밑바닥에서

시작하여 우뚝 서기를 바란다.

한 분야에서 최고가 되는 것은 아름다운 일이다.

그 길은 아름다운 길이고, 치열하고 힘든 길이다.

그 힘든 일을 즐겁게 할 수만 있다면

그게 바로 성공일 것이다.

싫은 일에서 새로운 창조적 힘이 솟을 리 없다.

늘 말하지만 네가 즐겁게 할 수 있는 일을 찾아라.

- 김용택의 《아들 마음 아버지 마음》 중에서 -