

공학석사 학위논문

Hovering type AUV의 자율운항  
시스템에 관한 연구

A Study on Autonomous Navigation System  
for Hovering type AUV

지도교수 김 준 영

2014년 12월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

홍 승 민

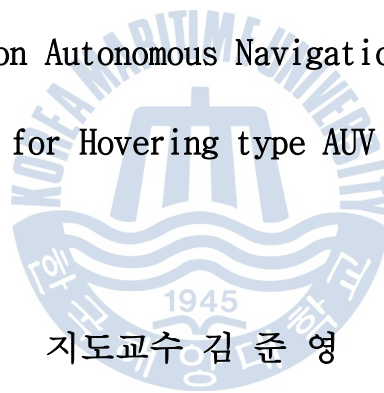


공학석사 학위논문

# Hovering type AUV의 자율운항 시스템에 관한 연구

A Study on Autonomous Navigation System

for Hovering type AUV



지도교수 김 준 영

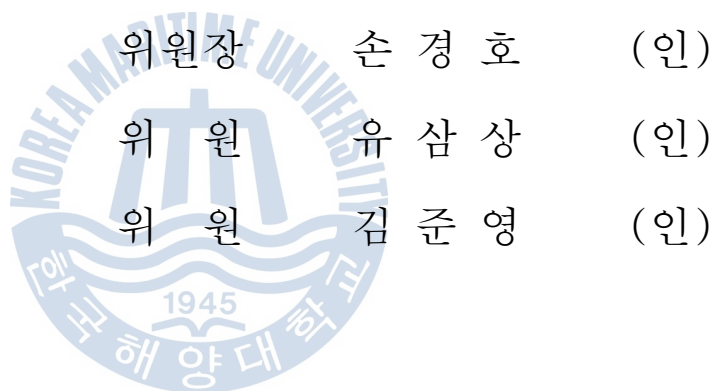
2014년 12월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

홍 승 민

본 논문을 홍승민의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2014년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

|  |      |
|--|------|
| List of Tables .....                   | vii  |
| List of Figures .....                  | viii |
| Abstract .....                         | xii  |
| <b>제 1 장 서 론</b>                       |      |
| 1.1 연구배경 .....                         | 1    |
| 1.2 연구내용 .....                         | 3    |
| <b>제 2 장 무인잠수정의 수학모델링 및 제어기 설계</b>     |      |
| 2.1 좌표계 설정 .....                       | 5    |
| 2.2 좌표변환 행렬 .....                      | 7    |
| 2.3 6자유도 비선형 운동 방정식 .....              | 8    |
| 2.4 제어기 설계 .....                       | 14   |
| 2.4.1 Thruster Allocation Method ..... | 14   |
| 2.4.2 PID 제어기 설계 .....                 | 15   |
| 2.4.3 Fuzzy PID 제어기 설계 .....           | 16   |
| 2.5 시뮬레이션 .....                        | 26   |
| 2.5.1 시뮬레이션 조건 .....                   | 27   |
| 2.5.2 시뮬레이션 결과 .....                   | 30   |

### 제 3 장 Hovering type AUV 설계 및 제작

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 3.1 설계 목표 .....                   | 36 |
| 3.2 Hovering type AUV 상세 설계 ..... | 39 |
| 3.3 내압용기 및 외각프레임의 내압해석 .....      | 42 |
| 3.3.1 내압용기 모델링 및 경계조건 .....       | 42 |
| 3.3.2 내압용기 압력 해석 결과 .....         | 44 |
| 3.3.3 외각프레임 경계조건 .....            | 45 |
| 3.4 하드웨어 구성 .....                 | 53 |
| 3.4.1 추진기 .....                   | 53 |
| 3.4.2 센서 .....                    | 55 |

### 제 4 장 실험역 성능 시험

|                  |    |
|------------------|----|
| 4.1 수심제어 .....   | 62 |
| 4.2 방향각 제어 ..... | 63 |
| 4.3 경유점 제어 ..... | 65 |

### 제 5 장 결 론 .....

|            |    |
|------------|----|
| 참고문헌 ..... | 72 |
|------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 감사의 글 ..... | 74 |
|-------------|----|

## List of Tables

|   |    |
|---|----|
| <b>Table 1</b> Notation of each axis .....                          | 6  |
| <b>Table 2</b> Fuzzy control rules for Depth, .....                 | 22 |
| <b>Table 3</b> Fuzzy control rules for Depth, .....                 | 22 |
| <b>Table 4</b> Fuzzy control rules for Pitch, .....                 | 22 |
| <b>Table 5</b> Fuzzy control rules for Pitch, .....                 | 23 |
| <b>Table 6</b> Fuzzy control rules for Heading, .....               | 23 |
| <b>Table 7</b> Fuzzy control rules for Heading, .....               | 23 |
| <b>Table 8</b> Fuzzy control rules for Heading, .....               | 24 |
| <b>Table 9</b> Fuzzy control rules for Velocity, .....              | 24 |
| <b>Table 10</b> Fuzzy control rules for Velocity, .....             | 24 |
| <b>Table 11</b> Fuzzy control rules for Velocity, .....             | 25 |
| <b>Table 12</b> Parameters and Specifications of Hovering AUV ..... | 38 |
| <b>Table 13</b> Material property of aluminum alloy 6061-T6 .....   | 43 |
| <b>Table 14</b> Buckling Pressure .....                             | 48 |
| <b>Table 15</b> Specification of Model 300 .....                    | 54 |
| <b>Table 16</b> Specification of Model 300 .....                    | 55 |

## List of Figures

|         |  |    |
|---------|--|----|
| Fig. 1  | Hovering type AUV  | 4  |
| Fig. 2  | Coordinate System  | 6  |
| Fig. 3  | Thrust Configuration   | 13 |
| Fig. 4  | Fuzzy Logic Diagram  | 17 |
| Fig. 5  | Input Fuzzification for Depth $e, \dot{e}$                     | 18 |
| Fig. 6  | Input Fuzzification for Pitch $e, \dot{e}$                     | 18 |
| Fig. 7  | Input Fuzzification for Heading $e, \dot{e}$                   | 19 |
| Fig. 8  | Input Fuzzification for Velocity $e, \dot{e}$                  | 19 |
| Fig. 9  | Output Fuzzification for Depth control gain $K_p, K_d$         | 20 |
| Fig. 10 | Output Fuzzification for Pitch control gain $K_p, K_d$         | 20 |
| Fig. 11 | Output Fuzzification for Heading control gain $K_p, K_d, K_i$  | 21 |
| Fig. 12 | Output Fuzzification for Velocity control gain $K_p, K_d, K_i$ | 21 |
| Fig. 13 | Simulator using Matlab & Simulink                              | 26 |
| Fig. 14 | Line Of Sight(LOS) Method                                      | 28 |
| Fig. 15 | Current model  | 29 |
| Fig. 16 | Thrust Curve   | 29 |
| Fig. 17 | X-Y trajectory   | 31 |
| Fig. 18 | 3D trajectory  | 31 |
| Fig. 19 | Result of Depth control  | 32 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 20</b> Result of Pitch angle control .....   | 33 |
| <b>Fig. 21</b> Result of Heading Angle control .....   | 33 |
| <b>Fig. 22</b> Result of Velocity control .....  | 34 |
| <b>Fig. 23</b> Thrust force through controller .....   | 35 |
| <b>Fig. 24</b> Input Voltage for thrust control .....  | 35 |
| <b>Fig. 25</b> Concept of Hovering AUV .....   | 37 |
| <b>Fig. 26</b> 3D Model of Outer Frame .....   | 39 |
| <b>Fig. 27</b> 3D Model of Outer Frame .....   | 39 |
| <b>Fig. 28</b> Pressure Container .....  | 40 |
| <b>Fig. 29</b> 3D Model Assembly .....   | 41 |
| <b>Fig. 30</b> Top view of Hovering AUV .....  | 41 |
| <b>Fig. 31</b> 3D Modeling .....   | 42 |
| <b>Fig. 32</b> (a) Geometry, (b) FE modeling, (c) boundary condition of pressure container ..... | 43 |
| <b>Fig. 33</b> Distribution of deformation .....   | 44 |
| <b>Fig. 34</b> Distribution of von Mises stress .....  | 45 |
| <b>Fig. 35</b> Design model of outer frame .....   | 45 |
| <b>Fig. 36</b> (a) Geometry, (b) FE modeling, (c) boundary condition of outer frame .....        | 46 |
| <b>Fig. 37</b> Distribution of von Mises stress .....  | 47 |

|         |                                      |    |
|---------|--------------------------------------|----|
| Fig. 38 | Distribution of deformation .....    | 47 |
| Fig. 39 | 1st Buckling Pressure .....          | 49 |
| Fig. 40 | 2nd Buckling Pressure .....          | 49 |
| Fig. 41 | 3rd Buckling Pressure .....          | 49 |
| Fig. 42 | 4th Buckling Pressure .....          | 49 |
| Fig. 43 | Outer Frame .....                    | 50 |
| Fig. 44 | Pressure container .....             | 50 |
| Fig. 45 | Hardware configuration .....         | 51 |
| Fig. 46 | Switch housing .....                 | 51 |
| Fig. 47 | Top view of Hovering AUV .....       | 52 |
| Fig. 48 | Side view of Hovering type AUV ..... | 52 |
| Fig. 49 | Tecnadyne Model 300 Thruster .....   | 53 |
| Fig. 50 | Tecnadyne Model 280 Thruster .....   | 54 |
| Fig. 51 | Pressure Sensor .....                | 55 |
| Fig. 52 | Magnetic compass .....               | 56 |
| Fig. 53 | GPS sensor .....                     | 56 |
| Fig. 54 | DVL sensor .....                     | 57 |
| Fig. 55 | DAQ board .....                      | 58 |
| Fig. 56 | DAQ board .....                      | 58 |
| Fig. 57 | On board PC .....                    | 59 |

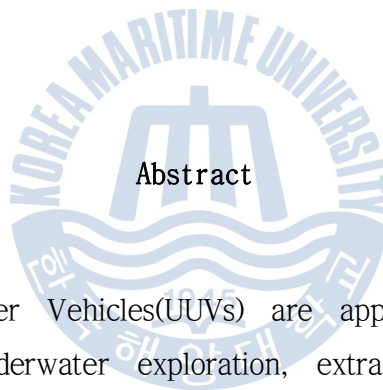
|                |  |    |
|----------------|--|----|
| <b>Fig. 58</b> | System configuration .....                   | 60 |
| <b>Fig. 59</b> | Field test site .....                        | 61 |
| <b>Fig. 60</b> | Result of Depth control .....                | 62 |
| <b>Fig. 61</b> | Thrust Input Voltage for Depth control ..... | 63 |
| <b>Fig. 62</b> | Result of Heading control .....              | 64 |
| <b>Fig. 63</b> | Thrust Voltage for Heading control .....     | 64 |
| <b>Fig. 64</b> | X-Y Trajectory of Hovering AUV .....         | 65 |
| <b>Fig. 65</b> | 3-D Trajectory of Hovering AUV .....         | 66 |
| <b>Fig. 66</b> | Result of Depth control .....                | 66 |
| <b>Fig. 67</b> | Heading Angle .....                          | 67 |
| <b>Fig. 68</b> | Velocity of Hovering AUV from DVL .....      | 68 |
| <b>Fig. 69</b> | State Value of Hovering AUV from TCM 5 ..... | 68 |
| <b>Fig. 70</b> | Thrust control input voltage .....           | 69 |

# A Study on Autonomous Navigation System for Hovering type AUV

Hong, Seung Min

Department of Material Engineering

*Graduate School of Korea Maritime and Ocean University*



## Abstract

Unmanned Underwater Vehicles(UUVs) are applying to a variety of purposes such as underwater exploration, extraction of minerals and military purpose. Also recently, as offshore industry has been expanding, UUVs will be expected to very useful instead of workers in underwater environments.

UUVs, sometimes known as underwater drones, are special vehicles that are able to operate underwater without a human occupant. These vehicles may be divided into two categorise, remotely operated underwater vehicles(ROVs), and autonomous underwater vehicles(AUVs).

We have been interested in development of AUV and how to control the AUV at the sea. It is reason why we start our research. The goal of this

study is technology accumulation of design and manufacturing, employ of AUV.

So, This paper addresses the development process of the Hovering type AUV as a test-bed. which has open-frame structure. This structure was designed to take a test conveniently. It has 4 thrusters and they can control 4-DOF motions such as surge, heave, pitch, and yaw. Various navigation sensors were installed for this vehicle. DVL & GPS are used in order to measure the position of the AUV. In addition, pressure sensor & magnetic compass are used for measuring the depth and heading angle of the AUV.

This thesis describes mathematical modeling of the AUV to confirm the dynamic motion and controller performance before the field test. In this step, we set the coordinate systems and derived the 6-DOF equation of motion. Mathematical modeling of the AUV was consist of 6-DOF equation of motion and hydrodynamic coefficients. To control the AUV, PID controller and Fuzzy PID controller were designed. In addition, We suggest the thruster allocation method for allocating thruster force at each thruster. To analyze the vehicle motion and designed controller to track the desired value, we developed the dynamic simulator using Matlab & Simulink software. Experimental test was performed such as depth control, heading control by PID controller. And autonomous navigation control like way-point control by PID controller and LOS(Line Of Sight) method at yacht harbor in Korea Maritime and Ocean University.

**KEY WORDS** : Hovering AUV 호버링 무인잠수정; Mathematical Modeling 수학적 모델링; PID controller PID 제어기; Fuzzy PID controller 퍼지 PID 제어기; Field test 실험역 실험

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

인간의 무한한 궁금증과 그것을 해결하고 싶어 하는 욕망은 과학기술의 발달을 가져왔고, 삶의 질을 향상시켰다. 이에 따라 인간은 황무지 이었던 육상을 최첨단의 시스템과 과학기술들이 집약된 구조로 변화시켰고, 항공기를 개발하여 하늘과 우주를 개척하였다.

시간이 지남에 따라 육상의 자원고갈 및 과학기술의 한계를 느낀 인간들은 바다라는 미지의 영역에 관심을 가지기 시작한다. 그리고 그들은 자신들의 목적에 맞게 바다를 개척하려고 노력하기 시작했다. 초기 유인잠수정을 이용하여 얕은 수심의 해저를 탐사하던 인간들은 점차 깊은 바다에 관심을 가지기 시작한다. 하지만 깊은 바다는 접근성이 떨어지고 불확실한 정보에 의한 위험요소들이 존재하기 때문에 인간들은 안정성 확보를 위하여 무인잠수정의 기술개발을 위하여 노력한다. 이러한 노력들은 탐사 또는 작업용 잠수정의 무인화의 발전에 기여하였고, 2차 세계대전 이후 미소 양국의 군사경쟁의 산물이라 할 수 있는 해저탐사기술은 현재 군사용, 심해저 광물 탐사용, 연구조사용 등 이용범위도 점차 확대되었다.

이렇게 개발된 무인잠수정은 크게 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 구분된다. ROV는 모선과 케이블로 연결되어 제어되는 시스템이다. 이러한 ROV 연결된 케이블에 의해 운용되어야 하기 때문에 비용이 높고 심해를 탐사할 경우 케이블의 길이가 길어지고 이에 따라 유체에 의한 저항을 많이 받는 단점이 있다.

AUV는 운용자가 제어명령을 내리면 잠수정 내부의 시스템에 의해 자율적으로 항해하는 잠수정을 말한다. AUV의 일반적인 형태는 Torpedo 즉, 어뢰형상

을 가진다. 또한 추진기와 수평 및 수직타를 이용하여 운동을 하게 되며, 각종 항해용 센서가 부착되어있고 ROV와 다르게 별도의 케이블이 필요 없는 장점이 있지만, 내부의 배터리 용량에 따라 항해시간이 결정되는 단점이 있다. 위의 설명과 같이 무인잠수정은 AUV 및 ROV로 나눌 수 있지만 형태나 사용목적에 따라 다른 이름을 사용하는 경우도 있다. 예를들어 ROV의 형태를 가지고 있지만 자율적으로 임무를 수행하는 Hovering AUV, 별도의 추진기 없이 무게중심과 부력중심의 변화를 이용하여 장시간 넓은 구역을 탐사하거나 특정 임무를 수행하는 Glider 뿐만 아니라 AUV와 같이 일정지역을 탐사하고 유사시에 ROV의 형태로 변환하여 해저에서 작업을 수행할 수 있는 Convertible AUV 등 다양한 형태의 무인잠수정이 연구·개발되고 있다.

이러한 무인잠수정의 연구·개발은 최근 해양산업의 발달에 따라 더욱 중요시 되고 있다. Douglas-westwood 사가 발표한 보고서(The World AUV Report, The World ROV Report)에는 세계 시장에서 추가로 건조될 ROV는 2011년 470개에서 2014년 573개로 36% 증가할 것으로 전망되었다. 또한 향후 5년간 시장 규모는 17억 달러에 달할 것으로 전망하였다.

이는 ROV가 주로 사용되는 심해 석유 및 가스 시추사업이 해양자원·에너지 사업 중 여전히 가장 큰 규모를 차지할 것에 따른 전망이고, 또한 AUV의 경우 현재 사용되는 군사용, 연구용, 탐사용, 기타 등 다양한 용도로 개발되고 수요가 요구되고 있는 상황이며, 이는 금액으로 23억 달러에 해당하는 것으로 알려지고 있다. 이에 수요가 증가 하고 있는 무인잠수정에 대해 선진국에서는 연구 개발에 대한 투자를 지속적으로 확대 하고 있다. 우리나라도 해양산업의 발전에 맞추어 지속적인 투자와 연구를 수행하고 있다. 현재 국내의 수중로봇기술은 세계 해양대국들에 비해 크게 뒤지지 않는 것으로 평가받고 있다. 우리나라는 2006년 11월에 6,000m급 심해무인잠수정 ‘해미래’를 개발했다. 해미래는 미국, 일본, 프랑스에 이어 세계 네 번째로, 전 세계 바다의 95% 이상을 탐사할 수 있는 능력을 확보하고 있다. 해미래를 개발한 한국해양연구원은 현재 AUV를 개발하고 있다. AUV는 잘 알려지지 않은 3차원 수중 공간에서 주어진 임무를 자율적으로 수행하기 때문에 임무에 대한 정확한 계획 및 수행, 장애물 회피와 같은 경로 계획, 안전한 귀환 및 진수 등의 과정이 무인잠수정 내부에서

이루어져야 한다. 이러한 잠수정의 항법 기술, 제어, 통신, 설계 기술을 개발하기 위해서는 많은 시간과 다양한 실험이 동반되어야 한다.

따라서 실험이 용이하고 다양한 항법 알고리즘을 확인 할 수 있는 Test-bed 용 무인잠수정의 필요하다고 판단하여 본 연구의 주제인 Hovering type AUV의 자율운항 시스템에 관한 연구를 수행하게 되었다.

## 1.2 연구내용

위의 연구배경에서 알 수 있듯이 무인잠수정의 설계 및 개발과 자율운항 항법시스템에 관한 연구는 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Test-bed용 Hovering type AUV를 개발함으로써 다양한 센서를 이용한 항법시스템 구축하고 항법알고리즘을 확인하는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 개발된 Test-bed용 무인잠수정의 설계목표와 설계과정 그리고 잠수정의 항법에 사용되는 센서 및 하드웨어 구성에 대해 소개하고 설계된 무인잠수정을 6자유도 운동방정식으로 표현하여 해석하였다. 무인잠수정의 운동 성능을 해석하기 위해 Matlab & Simulink를 활용해 시뮬레이터를 구성하였다. 그리고 무인잠수정의 제어를 위해 PID 제어기 및 Fuzzy PID 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 통해 제어기 성능을 확인 하였다. 제어기에서 출력된 제어입력은 각 추진기의 적절한 추력분배를 위해 추진기 분배방법을 제안하였고 시뮬레이션을 통해 추진기에 적절한 추력이 분배되는지 확인하였다. 끝으로 수조 및 실험실 실험을 통해 제작된 잠수정의 기본 운동성능을 파악하고 경유점 제어를 수행하였고 그 결과를 분석하였다.



아래 Fig. 1는 본 연구에서 개발된 Hovering type AUV를 나타낸다.

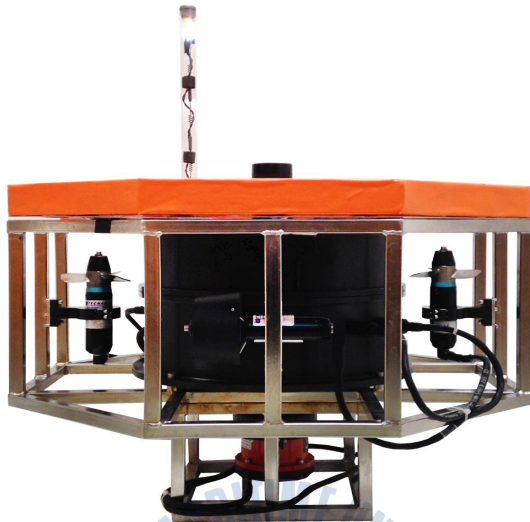
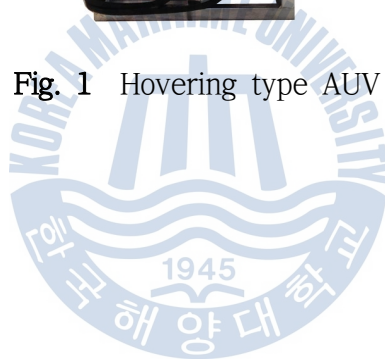


Fig. 1 Hovering type AUV



## 제 2 장 무인잠수정의 수학적모델링 및 제어기 설계

AUV는 운용자에 의해 조종되는 것이 아니고 주어진 명령에 따라 스스로 원하는 자세를 유지하고 목표 위치에 도달하여야 하며, 주위환경의 변화를 감지하여 주행경로를 판단하는 무인 자율주행 잠수정이므로 제어시스템이 필수적이다. 이러한 제어시스템을 개발하기 위해서는 여러 번의 설계와 실험을 반복해야하고 적지 않은 인력과 시간이 소모된다. 따라서 AUV를 설계하기 위해서는 우선 수학적인 모델을 이용하여 운동성능이나 제어성능을 해석하는 과정이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 AUV의 운동 상태를 해석할 수 있도록 6자유도의 비선형 운동방정식을 유도하고 이 운동방정식을 풀 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 다양한 입력과 환경 하에서 AUV의 운동성능을 확인하였다.

### 2.1 좌표계 설정

잠수정의 운동을 표현하기 위해서 좌표계 설정과 운동방정식에 사용되는 표기법을 정의 할 필요가 있다. 좌표계는 설계된 Hovering type AUV를 강제라 가정하고 Fig. 2와 같이 잠수정의 무게중심에 선체고정 좌표계(Body fixed coordinates)를 설정하고 잠수정의 운동을 운용자가 확인할 수 있도록 지구고정 좌표계(Earth fixed coordinates)를 설정하였다.

설정된 좌표계는 선수방향을 x-axis, 우현방향을 y-axis 그리고 연직하방을 z-axis으로 하는 오른손 좌표계를 사용하였다. 또한 설정된 좌표계의 각 축에 대한 병진운동과 회전운동을 6자유도 방정식을 표현할 수 있고 전개된 식에 사

용된 좌표축과 명칭은 Table 1과 같다.

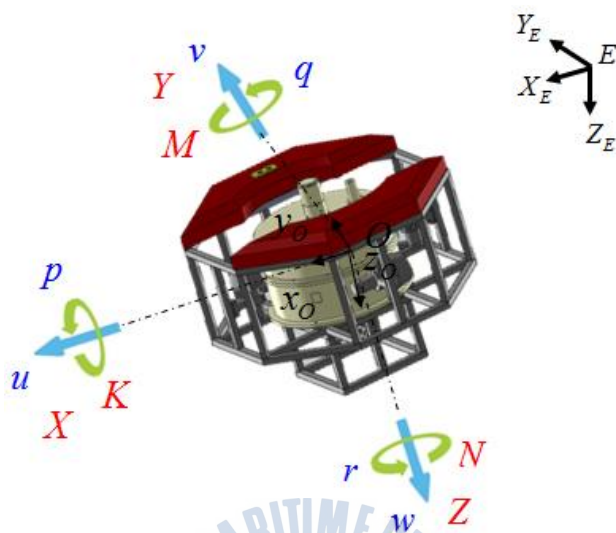


Fig. 2 Coordinate System

Table 1 Notation of each axis

| Classification       | Axis   | Motion | Displacement | Velocity | Force & Moment |
|----------------------|--------|--------|--------------|----------|----------------|
| Translational Motion | x-axis | Surge  | $x$          | $u$      | $X$            |
|                      | y-axis | Sway   | $y$          | $v$      | $Y$            |
|                      | z-axis | Heave  | $z$          | $w$      | $Z$            |
| Rotational Motion    | x-axis | Roll   | $\phi$       | $p$      | $K$            |
|                      | y-axis | Pitch  | $\theta$     | $q$      | $M$            |
|                      | z-axis | Yaw    | $\psi$       | $r$      | $N$            |

## 2.2 좌표변환 행렬

선체고정 좌표계에서 표현되는 선속도 및 각속도를 지구고정좌표계로 나타내기 위하여 Euler Angle를 이용하여 변환 행렬을 정의하였다. 먼저 선체고정 좌표계의 선속도를 지구고정좌표계로 표현하기 위한 변환행렬은 식(1)과 같다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1 \quad (1)$$

식(1)에서  $\eta_1 = [x, y, z]^T$ ,  $\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T$ ,  $\nu_1 = [u, v, w]^T$ 를 나타내며 변환행렬  $J_1(\eta_2)$ 은 다음과 같다.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & -s\psi c\varphi + c\psi s\theta s\varphi & s\psi s\varphi + c\psi c\theta c\varphi \\ s\psi c\theta & c\psi c\varphi + s\varphi s\theta s\psi & -c\psi s\varphi + s\theta s\psi c\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

또한 선체고정좌표계에서 표현되는 각속도를 지구고정좌표계로 표현하는 변환행렬은 식(3)으로 표현된다.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)\nu_2 \quad (3)$$

식 (3)에서  $\nu_2 = [p, q, r]^T$ 를 나타내며, 변환 행렬  $J_2(\eta_2)$ 는 다음과 같다.

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & t\theta s\varphi & c\theta t\theta \\ 0 & c\varphi & s\varphi \\ 0 & s\varphi/c\theta & c\varphi/c\theta \end{bmatrix}, \theta \neq \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

## 2.3 6자유도 비선형 운동 방정식

무인잠수정의 6자유도 운동은 병진운동(Translation motion)인 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)와 회전운동(Rotation motion)인 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)로 분류 할 수 있다.

본 논문에서 잠수정의 운동성능 및 제어기성능을 확인하기 위하여 전개한 6자유도 운동방정식은 식(5)와 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (5)$$

식(5)에서 각 항들은

$M$  = inertia matrix (including added mass)

$C(\nu)\nu$  = matrix of coriolis and centripetal terms (including added mass)

$D(\nu)\nu$  = damping matrix

$g(\eta)$  = vector of gravitational forces and moments

$\tau$  = vector of control inputs

$\nu$  = linear & angular velocity vector with coordinates in the body-fixed frame

$$= [u, v, w, p, q, r]'$$

$\eta$  = position & orientation vector with coordinates in the earth-fixed frame

$$= [x, y, z, \phi, \theta, \psi]'$$

을 나타낸다. 각 항들은 선체고정좌표계에서 표현된 힘과 모멘트이다.

아래에서 설명할 각각의 행렬에 포함된 요소들은 잠수정의 중력 중심의 좌표  $(x_g, y_g, z_g)$ , 2차 관성모멘트  $(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})$ , 는 미분항, 잠수정의 질량( $m$ ), 유체력 계수를 나타낸다.

식(5)에서 관성행렬  $M = M_{RB} + M_A$ 로 구성되며,  $M_{RB}$ 는 강체의 관성 행렬이며,  $M_A$ 는 수중에서 AUV의 주위 유체에 의해 발생하는 부가질량 행렬이다. 강체의 관성행렬  $M_{RB}$ 는  $M_{RB} = M_{RB}^T > 0$ ,  $\dot{M}_{RB} = 0$ 와 같은 조건을 만족하는 행렬이며. 행렬  $M_A$ 는 잠수정의 세 평면이 대칭이라 가정하면 비대각 요소를 무시할 수 있고 그때 행렬  $M_{RB}$ 와  $M_A$ 는 다음과 같다.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{xx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_A = -diag[X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r] \quad (7)$$

또한 행렬  $C(\nu) = C_{RB} + C_A$ 로 나타낼 수 있다. 강체의 coriolis와 centripetal 행렬  $C_{RB}(\nu)$ 는 파라미터로 표현할 수 있으며 이 행렬은 skew-symmetry이다. 행렬  $C_{RB}$ 와  $C_A$ 는 다음과 같다.

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)에서 각각의 요소는

$$C_{12} = \begin{bmatrix} m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ -m(y_g p + w) & m(z_g r + w_g p) & -m(y_g r - u) \\ -m(z_g p - v) & -m(z_g q + u) & m(x_g p + y_g q) \end{bmatrix}$$

$$C_{21} = \begin{bmatrix} -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q + u) \\ m(x_g r + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

를 나타낸다.

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_w \cdot w & Y_v \cdot v \\ 0 & 0 & 0 & Z_w \cdot w & 0 & -X_u \cdot u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_v \cdot v & X_u \cdot u & 0 \\ 0 & -Z_w \cdot w & Y_v \cdot v & 0 & -N_r \cdot r & M_q \cdot q \\ Z_w \cdot w & 0 & -X_u \cdot u & N_r \cdot r & 0 & -K_p \cdot p \\ -Y_v \cdot v & X_u \cdot u & 0 & -M_q \cdot q & K_p \cdot p & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

행렬  $D(\nu)$ 는 유체에서 이동하는 강체에 작용하는 감쇠력을 나타내는 행렬이며, 이 행렬은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$D(\nu) = -diag[X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r] \quad (10)$$

$$-diag[X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|]$$

잠수정의 복원력 벡터를 나타내는  $g(\eta)$  행렬은 잠수정의 무게와 부력 그리고 오일러 각으로 표현된다.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W-B)\sin\theta \\ -(W-B)\cos\theta\sin\phi \\ -(W-B)\cos\theta\cos\phi \\ -(y_G W - y_B B)\cos\theta\cos\phi + (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \\ (z_G W - z_B B)\sin\theta + (x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi \\ -(x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi - (y_G W - y_B B)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

각 행렬들을 식(5)에 대입하여 전개하면 Abkowitz가 전개한 식(12)을 얻을 수 있다. 전개된 식 (12)는 무인잠수정의 6자유도 비선형운동을 나타내며, 위에서부터 세 번째 식은 잠수정의 병진운동을 나타내며, 네 번째부터 6번째 식은 회전운동을 나타낸다. 전개된 식은 잠수정을 설계할 때 결정되는 질량, 무게중심 등의 파라미터와 잠수정의 형상에 의해 결정되는 유체력 계수로 구성되어 있다.



$$\begin{aligned}
\text{Surge} & : m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + z_g(pr + \dot{q})] & = X \\
\text{Sway} & : m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(pq + \dot{r})] & = Y \\
\text{Heave} & : m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(qr + \dot{p})] & = Z \\
\text{Roll} & : I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{zx}(pq + \dot{r}) \\
& \quad + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] & = K \\
\text{Pitch} & : I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr - I_{zx}(r^2 - p^2) + I_{yz}(pq - \dot{r}) - I_{xy}(qr + \dot{p}) \\
& \quad + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] & = M \\
\text{Yaw} & : I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{zx}(qr - \dot{p}) - I_{yz}(pr + \dot{q}) \\
& \quad + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] & = N
\end{aligned} \tag{12}$$



본 연구에서 설계된 Hovering type AUV는 다수의 추진기를 사용하여 잠수정의 운동을 제어하게 된다. 따라서 추진기에서 발생하는 힘을 외력이라 하면 전개된 무인잠수정의 6자유도 운동방정식 우변에 추진기의 위치 및 방향을 고려하여 추력을 추가 할 수 있다.

추진기의 위치와 방향은 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3에 표시된 1, 2는 수평 방향의 추진기를 나타내며, 3, 4는 수직방향의 추진기를 나타낸다. 따라서 추진기의 추력에 의해 발생하는 힘과 모멘트는 식(13)과 같다.

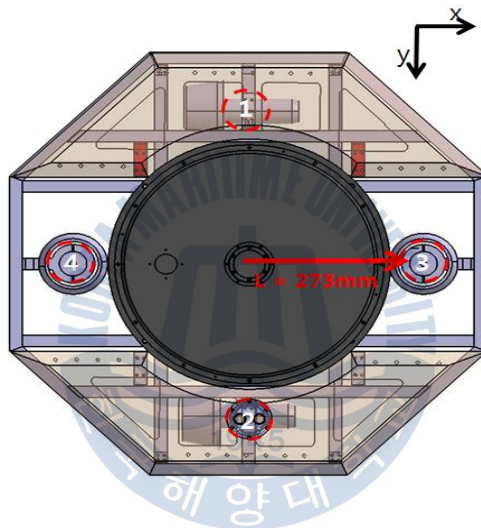


Fig. 3 Thrust Configuration

$$\Sigma F_x = F_1 + F_2 \tag{13}$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_z = F_3 + F_4$$

$$\Sigma M_x = 0$$

$$\Sigma M_y = -l \cdot F_3 + l \cdot F_4$$

$$\Sigma M_z = -l \cdot F_1 + l \cdot F_2$$

## 2.4 제어기 설계

설계된 Hovering type AUV는 일정한 지역을 탐사하거나 수중에서 작업을 하고 주어진 임무를 완수하면 모션으로 회귀해야하는 목적을 갖고 있다. 이러한 무인잠수정의 동적 거동은 비선형적인 요소와 연성운동이 발생하기 때문에 자세 또는 위치를 제어하기 어려운 시스템이다.

본 연구에서는 잠수정의 제어를 위해 고전적인 PID 제어기 및 강인제어기인 Fuzzy PID 제어기를 설계했다. 또한 다수의 추진기를 사용하는 Hovering type AUV에 적절한 추력을 분배하기 위한 Thruster Allocation Method을 적용하였다.

### 2.4.1 Thruster Allocation Method

앞 절에서 설명한 추진기의 위치와 방향을 고려한 각 축에 대한 힘과 모멘트를 행렬로 나타내면 추진기 구성행렬을 (14)과 같이 결정 할 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -l & l \\ l & -l & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

추진기에 의해 발생하는 힘과 모멘트는 식(15)와 같이 나타낼 수 있고

$$\tau_T = T \cdot F_T \quad (15)$$

여기서,  $\tau_T = [\sum F_x, \sum F_z, \sum M_y, \sum M_z]^T$

$F_T = [F_1, F_2, F_3, F_4]^T$  를 나타낸다.

따라서 제어를 위한 추력  $F_T$ 는 식(16) 으로부터 결정 할 수 있다.

$$F_T = T^* \cdot \tau_T \quad (16)$$

여기서,  $T^*$ 는 역행렬을 나타낸다.

## 2.4.2 PID 제어기 설계

추진기의 추력을 계산하기 위하여 잠수정의 운동에 필요한 각 축의 힘과 모멘트를 계산 할 필요가 있고, 이 힘과 모멘트를 결정하기 위해 본 논문에서는 PID 제어기를 설계하였다. PID 제어기는 제어 시스템에서 가장 널리 사용되는 제어방식이다. 이는 비례(Proportional, P)제어 동작, 적분(Integral, I)제어 동작 그리고 미분(Differential, D)제어 동작으로 이루어진다. PID 제어기를 설계하기 위해서는 비례, 적분, 미분제어의 성능을 잘 파악하는 것이 중요하다. 비례 게인 값이 클 경우 오차를 빠르게 줄 일 수 있지만 오버슈트가 발생하며, 적분 게인 값은 시스템의 정상상태 오차를 줄여주는 효과가 있지만 시스템의 차수가 증가하고 이에 따라 응답속도가 늦어 질 수 있다. 또한 미분 게인은 시스템의 안정성을 높이며 오버슈트를 감소시키고 과도응답을 좋게 하는 효과가 있지만 시스템의 잡음성분이 있을 경우 제어입력에 나쁜 영향을 미치는 단점이 있다. 따라서 적절한 형태의 PID 제어기를 설계 할 필요가 있다.

PID 제어기의 일반적인 형태는 식(17)과 같다.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

여기서,  $u(t)$  = Control Input

$e$  = Desired Value - Current Value

$K_p$  = Proportional Gain

$K_I$  = Integral Gain

$K_D$  = Derivate Gain

을 나타낸다.

본 연구에서 개발된 잠수정은 수평 및 수직 추진기를 각 2대 사용하여 4자유도의 운동을 제어 할 수 있다. 따라서 제어기에서 출력되는 제어입력은 X, Z

방향의 힘과 Y, Z방향의 모멘트가 된다.

설계된 수심제어기는 PD 제어기로 수심방향의 운동을 지배적으로 나타내는 변수인 수심방향의 위치와 피치방향의 운동을 고려하여 설계 하였다. 설계된 수심제어기는 다음과 같은 식 (18)로 표현된다.

$$\tau_n = K_{pm}e_n + K_{dn}\dot{e}_n \quad (18)$$

여기서,  $n = \{1, 2\} = \{Heave, Pitch\}$  ,  $e_n = \begin{cases} Z_d - Z \\ \theta_d - \theta \end{cases}$  이다.

또한 방향각 및 잠수정의 직진 속도를 제어하기 위해 설계된 PID 제어기는 식(19)으로 표현된다.

$$\tau_i = K_{pi}e_i + K_{ii} \int e_i dt + K_{di}\dot{e}_i \quad (19)$$

여기서,  $i = \{1, 2\} = \{Yaw, Velocity\}$  ,  $e_i = \begin{cases} \psi_d - \psi \\ u_d - u \end{cases}$  이다.

PID 제어기에 사용된 게인 값은 시행착오 방법을 통하여 무인잠수정이 적절한 응답을 보이는 값을 선정하였다.

### 2.4.3 Fuzzy PID 제어기 설계

퍼지 논리는 기존의 논리 체계에 비해 인간의 사고 측면에 많은 유사성을 가지고 있으므로 불확실한 현상을 기술하는데 효과적으로 이용되고 있다. Fuzzy 제어는 Fuzzy inference rule에 의해 제어기의 성능이 결정되며, 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있지만 Fuzzy 제어는 비선형적이고 복잡한 동적 특성의 변화를 지닌 시스템에 적용될 수 있으며 따라서 기존의 PID 제어기보다 강인한 제어기라 할 수 있다. 퍼지 제어방식은 여러 가지 방법으로 나눌 수 있으나, 본

연구에서는 경험적 근거를 바탕으로 퍼지 추론을 하였으며 퍼지 논리와 설계된 PID를 조합하는 방법을 연구 하였다. 일반적으로 퍼지 제어기는 퍼지화(Fuzzification), 퍼지 규칙(Fuzzy Rule Base), 퍼지 추론(Fuzzy Inference) 및 비퍼지화(Defuzzification)로 구성되며 Fig. 4와 같다.

퍼지화(Fuzzification)는 일반적인 물리량을 퍼지 집합으로 표현해 주는 과정이며 이 과정에서 각 집합의 원소들의 소속정도를 계산해주는 함수를 소속함수(Membership Function)라 한다. 본 연구에서는 제어 대상에 따라 입력변수와 출력변수들의 Membership Function을 Fig. 5 ~ Fig. 12과 같이 설정하였다.

다음 단계인 퍼지 규칙(Fuzzy Rule Base)는 제어 대상부에 대한 지식과 제어 규칙들이 정의되어 있다. 퍼지 제어 규칙을 얻기 위한 방법에는 전문가의 경험과 지식에 근거한 방법, 조작자의 제어기능을 추출하는 방법, 플랜트의 퍼지 모델에 의한 방법, 자체 학습기능을 부여하는 방법 등이 있으며 If-Then 문으로 구성되어 있다. Table 2 ~ Table 11는 경험과 반복적인 학습을 통해 결정된 퍼지 제어 규칙을 나타낸다. 퍼지 추론은 여러 가지 퍼지 규칙들과 주어진 입력값으로부터 하나의 결론을 이끌어 내는 부분이다. 추론 법은 일반적으로 Mamdani가 제안한 Minimum 연산을 이용한 추론법이 이용되며, 본 연구에서도 이 방법을 사용하였다.

비퍼지화(Defuzzification)은 실제로 퍼지 추론 결과가 시스템을 제어하는데 사용되기 위해서는 일반적인 물리량으로 변환되어야 하는데 이 과정을 비퍼지화라고 한다.

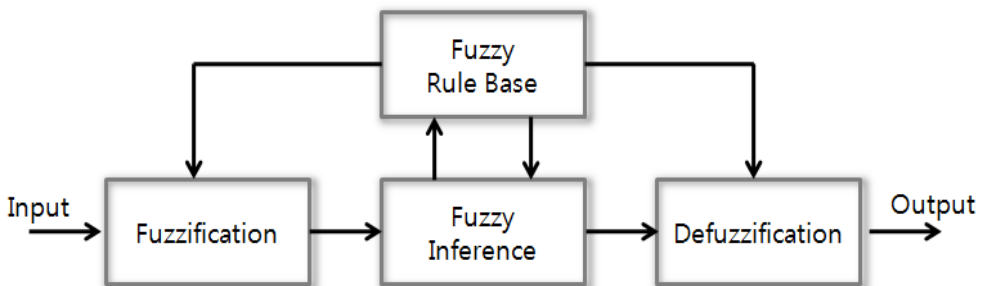


Fig. 4 Fuzzy Logic Diagram

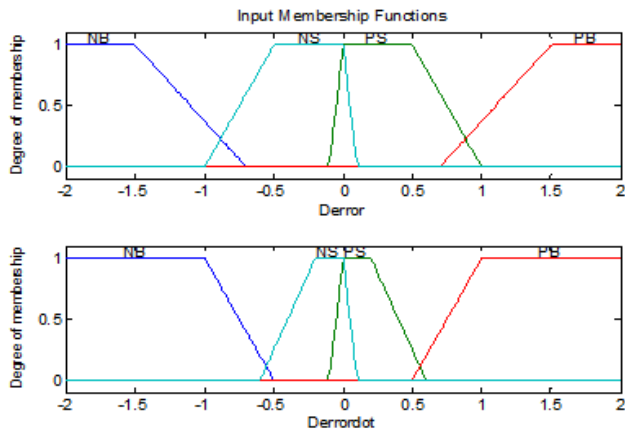


Fig. 5 Input Fuzzification for Depth  $e, \dot{e}$

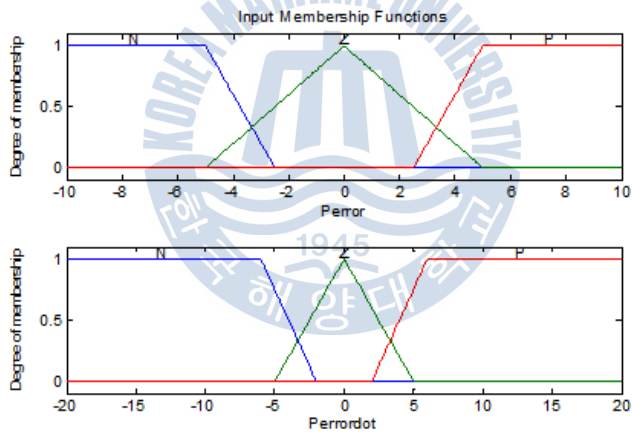


Fig. 6 Input Fuzzification for Pitch  $e, \dot{e}$

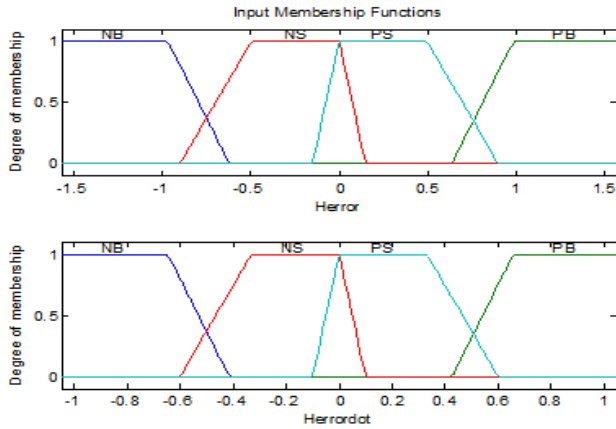


Fig. 7 Input Fuzzification for Heading  $e, \dot{e}$

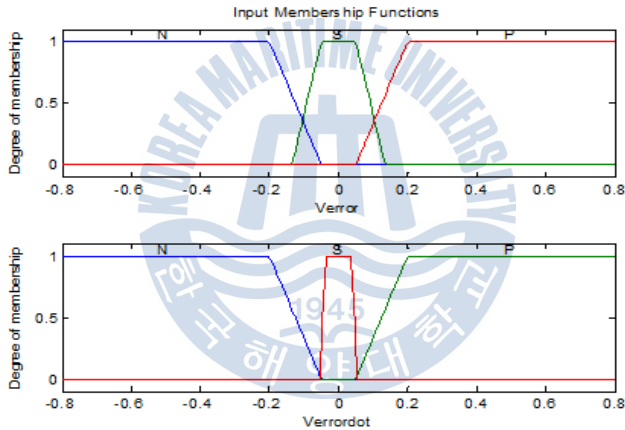


Fig. 8 Input Fuzzification for Velocity  $e, \dot{e}$

퍼지집합 'error', 'errordot'는 Fig. 5 ~ Fig. 8에 나타난 것과 같이 NB(Negative Big), NS(Negative Small), PS(Positive Small), PB(Positive Big), N(Negative), S(Small), P(Positive), Z(Zero)의 Member를 갖고 있다.

출력이 되는 PID 게인 값에 대한 소속 함수는 Fig. 9 ~ Fig. 12에 나타나있다.



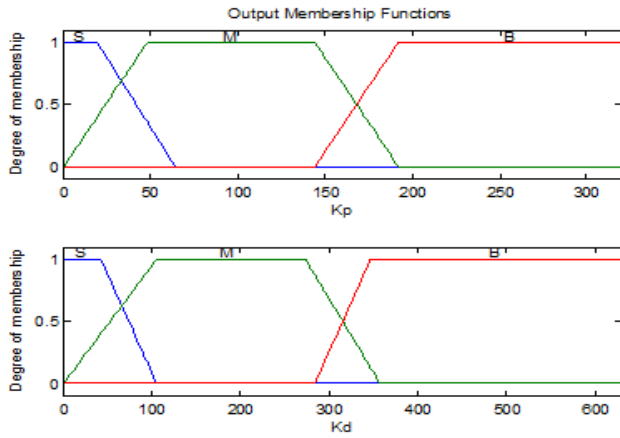


Fig. 9 Output Fuzzification for Depth control gain  $K_p, K_d$

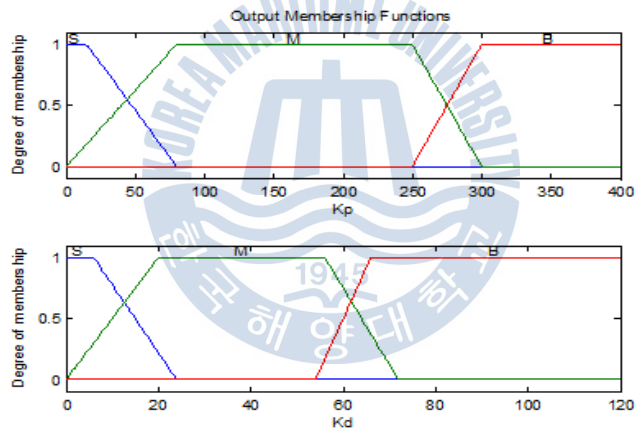


Fig. 10 Output Fuzzification for Pitch control gain  $K_p, K_d$

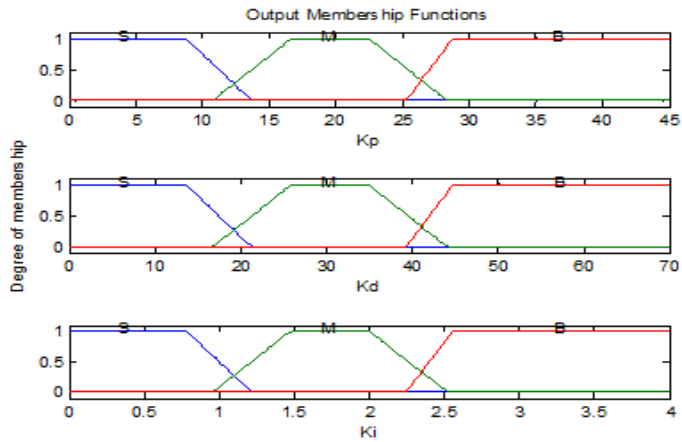


Fig. 11 Output Fuzzification for Heading control gain  
 $K_v, K_d, K_i$

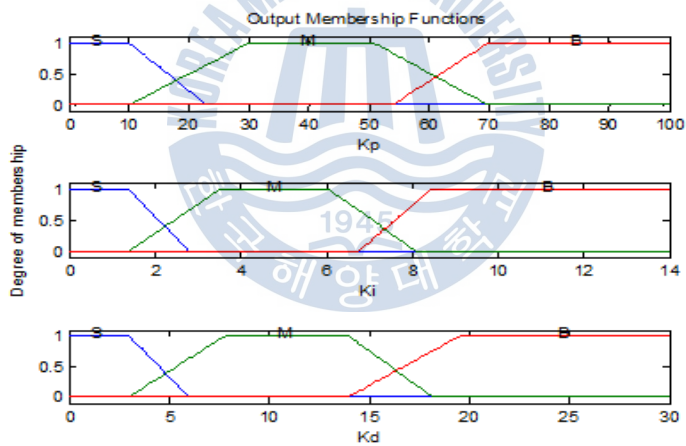


Fig. 12 Output Fuzzification for Velocity control gain  
 $K_v, K_d, K_i$

출력은 각 제어대상의 PID 제어기의 게인 값이며, S(Small), M(Medium), B(Big) 세 개의 멤버를 가진다. 퍼지집합이 결정되면 각 멤버들을 이용하여 퍼지 제어규칙을 만들게 된다. 퍼지 제어규칙은 제어기를 설계하는 사람의 경험적 지식을 기초로 하여 만들어진다.

퍼지 제어규칙은 (If - then -) 형식으로 표현되며 본 연구에서 사용되는 퍼지 제어규칙을 기술하면 다음 Table 2 ~ Table 11과 같다.

**Table 2** Fuzzy control rules for Depth,  $K_p$

| $e \backslash \dot{e}$ | NB | NS | PS | PB |
|------------------------|----|----|----|----|
| NB                     | B  | M  | M  | B  |
| NS                     | B  | S  | S  | B  |
| PS                     | B  | S  | S  | B  |
| PB                     | B  | M  | M  | B  |

**Table 3** Fuzzy control rules for Depth,  $K_d$

| $e \backslash \dot{e}$ | NB | NS | PS | PB |
|------------------------|----|----|----|----|
| NB                     | B  | B  | B  | B  |
| NS                     | M  | S  | S  | M  |
| PS                     | B  | S  | S  | M  |
| PB                     | B  | B  | B  | B  |

**Table 4** Fuzzy control rules for Pitch,  $K_p$

| $e \backslash \dot{e}$ | N | Z | P |
|------------------------|---|---|---|
| N                      | B | M | M |
| Z                      | B | S | S |
| P                      | B | S | S |

**Table 5** Fuzzy control rules for Pitch,  $K_d$

| $e \backslash \dot{e}$ | N | Z | P |
|------------------------|---|---|---|
| N                      | B | M | B |
| Z                      | S | S | S |
| P                      | M | M | M |

**Table 6** Fuzzy control rules for Heading,  $K_p$

| $e \backslash \dot{e}$ | NB | NS | PS | PB |
|------------------------|----|----|----|----|
| NB                     | B  | M  | M  | B  |
| NS                     | B  | M  | M  | B  |
| PS                     | B  | B  | M  | B  |
| PB                     | B  | M  | M  | B  |

**Table 7** Fuzzy control rules for Heading,  $K_i$

| $e \backslash \dot{e}$ | NB | NS | PS | PB |
|------------------------|----|----|----|----|
| NB                     | M  | M  | M  | S  |
| NS                     | M  | M  | M  | S  |
| PS                     | M  | B  | M  | M  |
| PB                     | S  | B  | B  | B  |

**Table 8** Fuzzy control rules for Heading,  $K_d$

| $e \backslash \dot{e}$ | NB | NS | PS | PB |
|------------------------|----|----|----|----|
| NB                     | B  | B  | B  | B  |
| NS                     | M  | B  | B  | B  |
| PS                     | M  | B  | B  | M  |
| PB                     | B  | M  | M  | M  |

**Table 9** Fuzzy control rules for Velocity,  $K_p$

| $e \backslash \dot{e}$ | N | S | P |
|------------------------|---|---|---|
| N                      | M | S | B |
| S                      | B | M | B |
| P                      | B | M | B |

**Table 10** Fuzzy control rules for Velocity,  $K_i$

| $e \backslash \dot{e}$ | N | S | P |
|------------------------|---|---|---|
| N                      | M | B | M |
| S                      | B | M | M |
| P                      | M | B | M |

**Table 11** Fuzzy control rules for Velocity,  $K_d$

| $e \backslash \dot{e}$ | N | S | P |
|------------------------|---|---|---|
| N                      | B | B | B |
| S                      | B | B | M |
| P                      | B | B | B |

위의 Table 2 ~ Table 11과 같이 결정된 제어규칙은 Mamdani방법을 통해서 추론을 하게 된다. 비퍼지화 방법으로는 중심평균법을 사용하였다. 따라서 비퍼지화된 출력은 식 (20)과 같이 정의된다.

$$dU = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i) \times w_i}{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i)} \quad (20)$$

여기서, n은 퍼지제어 규칙의 수,  $w_i$ 는 멤버의 최대 값 그리고  $\mu_{output}(w_i)$ 는 멤버의 소속정도를 나타낸다.

## 2.5 시뮬레이션

수조 또는 실험실 실험 이전에 다양한 조건에서 설계된 제어기의 성능을 확인하는 작업이 필요하다. 따라서 전개된 운동방정식과 설계된 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전개된 6자유도 운동방정식에 포함된 유체력 계수 및 다수의 파라미터는 Garus(2012)를 참조하여 사용하였다. 또한 시뮬레이션 프로그램은 Matlab&Simulink로 구성하였으며 Fig. 13와 같다.

Fig. 13 와 같이 구성된 Simulator는 크게 4부분으로 나눌 수 있다. 표시된 번호 ①은 시뮬레이션에 필요한 파라미터를 설정하고 시뮬레이션을 수행한 후 데이터를 그래프로 나타내는 블록이다. ②은 조류와 같은 외란을 설정하는 블록이며, ③은 전개된 6자유도 운동방정식과 좌표변환을 위한 블록이다. ④은 설계된 제어기를 나타내며 현재 변수들을 피드백 받아 목표 값에 도달 할 수 있도록 출력 값을 계산하는 블록이다.

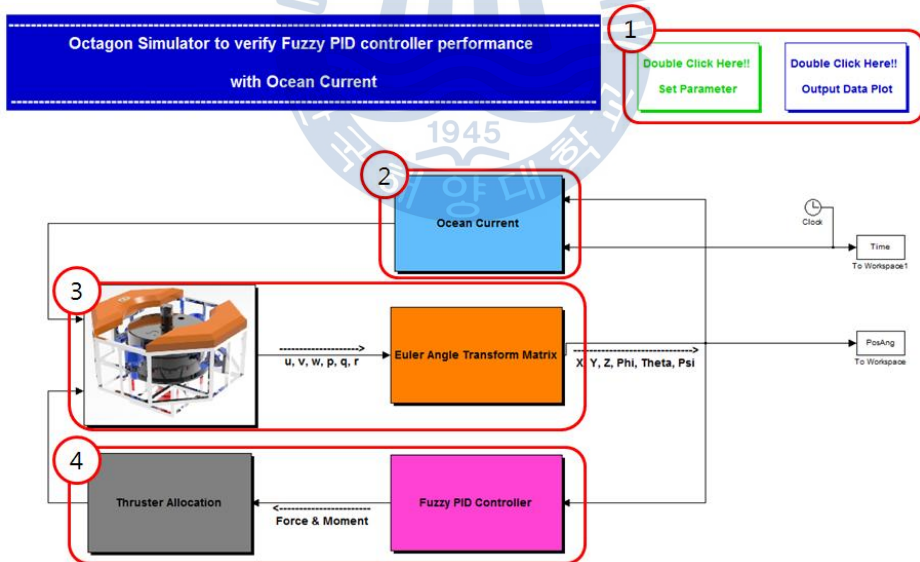


Fig. 13 Simulator using Matlab & Simulink

## 2.5.1 시뮬레이션 조건

설계된 무인잠수정의 운동성능 및 제어기 성능을 확인하기 위하여 다음과 같은 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 무인잠수정은 일정지역을 탐사하기 위하여 주어진 경유점을 통과하여 목표점까지 도달해야 할 필요성이 있고 따라서 시뮬레이션은 기본적인 LOS(Line Of Sight)방법을 통한 경유점 제어를 하였고, PID 제어기와 Fuzzy PID 제어기의 성능을 확인하였다. 이때 간단한 조류를 외란으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

무인잠수정이 주어진 경유점(Way-point)를 찾아가기 위해서는 현재위치와 목표점의 위치를 이용하여 방향각을 결정 할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 LOS(Line Of Sight)방법을 이용하여 방향각을 찾고, 현재위치와 목표점의 위치를 이용하여 잠수정이 목표점에 도달하였는지를 판단하였다. Fig. 14는 LOS방법을 나타내고 있다.

LOS방법을 통해 목표방향각을 찾으면 무인잠수정은 현재위치와 목표점의 위치 사이의 거리를 식(21)과 같이 계산한다.

$$d = \sqrt{(X_0 - X)^2 + (Y - Y_0)^2} \quad (21)$$

여기서,  $X_0, Y_0$ 는 잠수정의 현재위치이며  $X, Y$ 는 목표점의 위치를 나타낸다.

수중에서 운동하는 무인잠수정의 운동특성상 정확한 경유점을 통과하기 어렵다. 따라서 잠수정의 운동을 고려한 유효반경( $r$ )을 설정 하여 잠수정이 목표점에 도달하였는지 판단하였다. 이때 잠수정은 식(21)으로부터 구한 거리와 유효반경을 아래와 같이 비교해 다음 운동을 결정하게 된다.



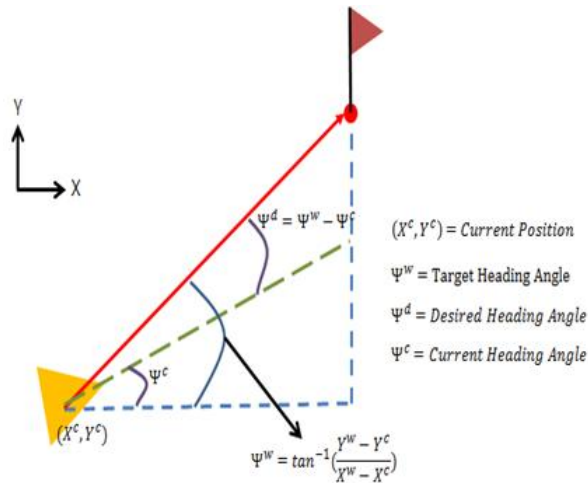


Fig. 14 Line Of Sight(LOS) Method

If 유효반경( $r$ ) > 거리( $d$ ), 목표점을 바꾸지 않고 계속 진행.

If 유효반경( $r$ ) < 거리( $d$ ), 다음 목표점으로 변경.

시뮬레이션에서 잠수정의 외란으로 사용된 조류는 Fossen(1994)를 참조하여 다음 Fig. 15와 같이 2차원의 방향과 속도를 가지는 벡터로 설정하였다. 이때 조류의 방향은  $20^\circ$  이며 속도는  $0.1\text{m/s}$ 로 설정하였다.

Fig.15에서  $X, Y$ 는 지구고정좌표계,  $X_0, Y_0$ 는 선체고정좌표계,  $V_c$ 는 조류,  $u_c^E, v_c^E$ 는 지구고정좌표계에서의  $X, Y$ 축의 조류속도,  $u_c, v_c$ 는 선체고정좌표계에서의 각 축에 대한 조류속도,  $\beta$ 는 조류의 방향,  $\psi$ 는 잠수정의 방향을 나타낸다.

2차원의 조류는 선체고정좌표계로 표현할 수 있으며, 이때  $x$ -axis,  $y$ -axis 방향의 속도는 식(21)에 의해 얻을 수 있다.

$$u_c = V_c \cdot \cos(\beta - \psi) \quad (21)$$

$$v_c = V_c \cdot \sin(\beta - \psi)$$

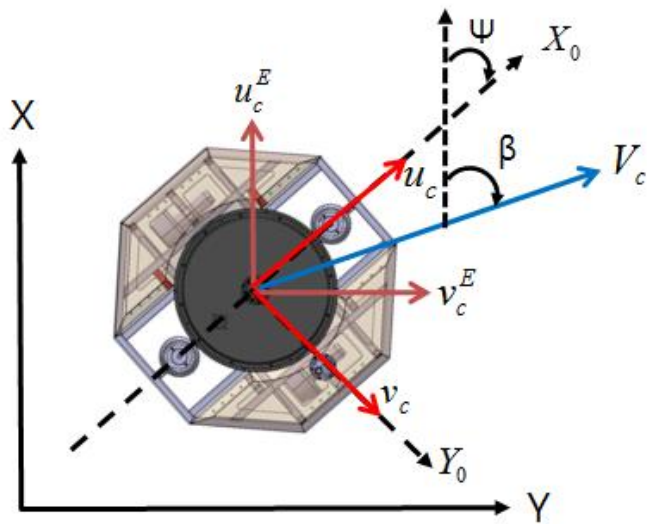


Fig. 15 Current model

또한 실제 설계된 무인잠수정에 사용될 추진기(Tecnadyne Model300)의 입력 전압에 따른 추력곡선을 Fig. 16와 같이 실험을 통해 비선형 그래프를 얻었고 이를 시뮬레이션에 사용하였다. 입력 전압에 따른 추력은 식(22)와 같이 나타낼 수 있다.

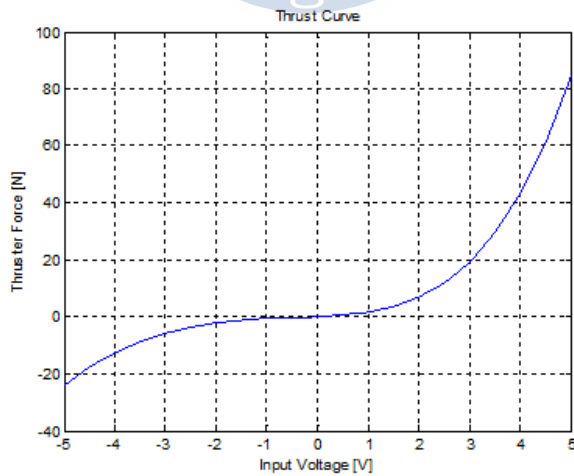


Fig. 16 Thrust Curve

$$F_T = 0.002 \times Vol^5 + 0.03 \times Vol^4 + 0.356 \times Vol^3 + 0.47 \times Vol^2 + 0.782 \times Vol \quad (22)$$

여기서,  $F_T$ 는 추진기의 힘을 이며,  $Vol$ 은 입력전압(-5V ~ +5V)를 나타낸다.

## 2.5.2 시뮬레이션 결과

Fig. 17 ~ Fig. 24는 시뮬레이션 결과 그래프를 나타내고 있다.

Fig. 17은 X-Y평면의 잠수정의 이동경로를 나타낸다. 초기위치 (0, 0)에서 주어진 5개의 경유점을 지나 (50, 100)에 도달하는 것을 볼 수 있다. 그래프에 나타난 각 격자점의 화살표는 조류 방향을 의미한다. 각 목표점을 통과하여 다음 목표점으로 방향각이 전환 될 때 잠수정은 조류에 의해 표류(drift)되는 것을 볼 수 있으나 주어진 목표점을 잘 찾아가는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 18은 3차원의 잠수정 이동 경로를 나타내며, 초기위치 (0,0,0)에서 수심방향으로 1m 이동 후 다음 목표점의 방향각을 찾고 이동하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 5번째 목표지점에서 도달한 후 다시 수평면으로 부상하는 것을 그래프에서 확인 할 수 있다.

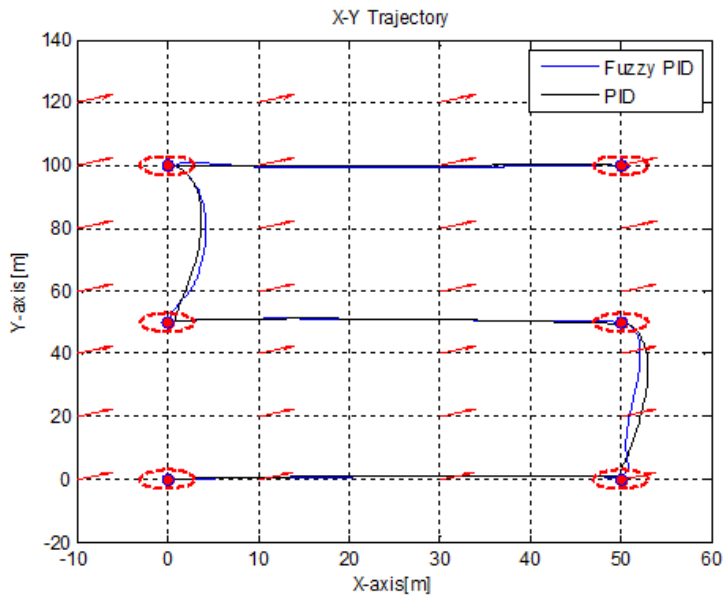


Fig. 17 X-Y trajectory

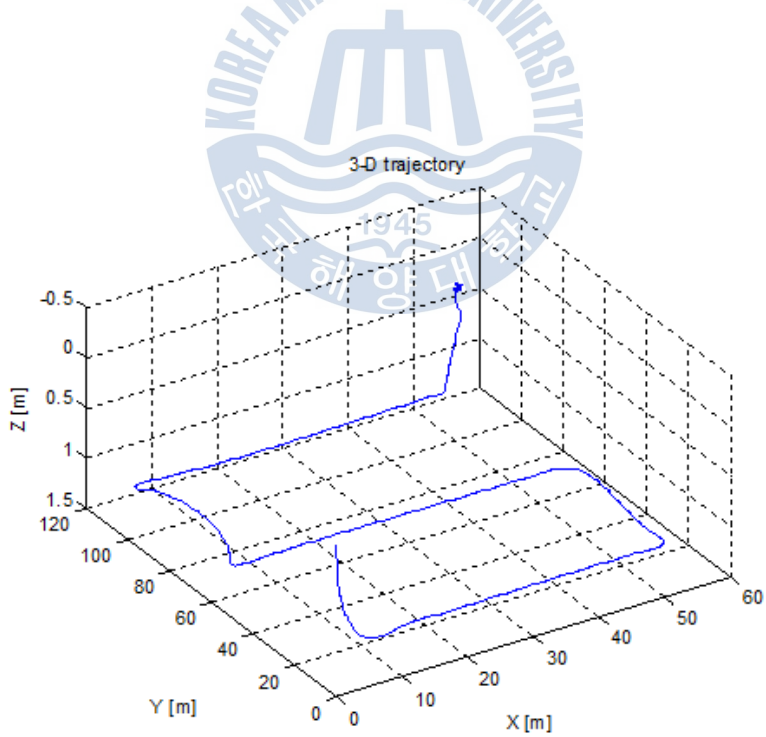


Fig. 18 3D trajectory

Fig. 19에서는 잠수정이 초기에 목표수심 1m를 추종하고 수심을 유지하면서 이동하는 것을 확인 할 수 있으며, 마지막 경유점에서는 다시 수면으로 부상하는 것을 그래프를 통해 확인 할 수 있다. 이때 Fuzz PID로 제어한 경우 일반 PID제어보다 오버슈트가 줄어들고 정상상태에 도달하는 시간이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다.

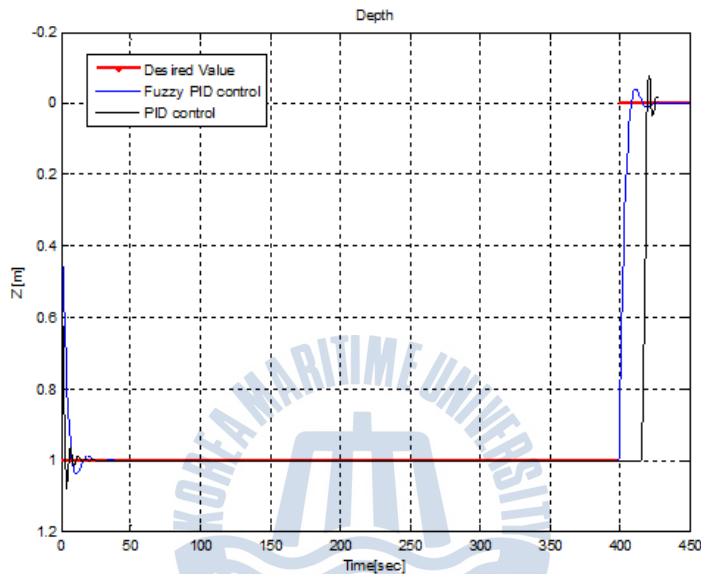


Fig. 19 Result of Depth control

Fig. 20는 잠수정의 Pitch Angle를 제어한 결과 그래프를 나타낸다. Pitch Angle을 제어한 이유는 수중 운동체의 운동에서 수심방향의 운동과 Y축의 회전(Pitch)는 서로 영향을 미치기 때문이다. 본 논문에서는 Hovering AUV의 특성을 고려하여 수심방향의 운동 시 발생하는 Pitch Angle은  $0^\circ$  를 유지해야한다고 판단하여 목표 Pitch Angle을  $0^\circ$  로 설정하였다. Fig. 19에 나타나듯이 초기에 약  $0.1^\circ$  내에서 각도의 진동이 있는 것을 확인 할 수 있으며 시간이 지나면서 0에서 작은 오차범위를 가지며 진동을 하는 것을 알 수 있다. 이 각도는 실제 아주 작은 각도로써 잠수정의 운동에 큰 영향을 주지 않는다고 판단 할 수 있다.

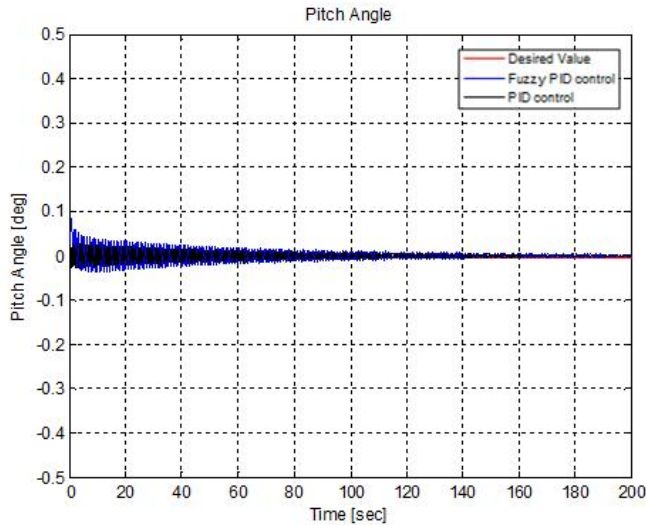


Fig. 20 Result of Pitch angle control

Fig. 21는 주어진 목표점을 찾아가는 동안 잠수정의 방향각을 나타낸다. 잠수정의 목표방향각은 앞 절에서 소개한 LOS(Line Of Sight)방법을 이용하여 결정하게 된다. Fuzzy PID 제어를 한 경우 PID 제어보다 오버 슈트가 줄고 정상상태 오차가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 또한 목표방향각이 변할 때 순간적으로 생기는 반대방향의 방향각도 생기지 않는 것을 확인 할 수 있다.

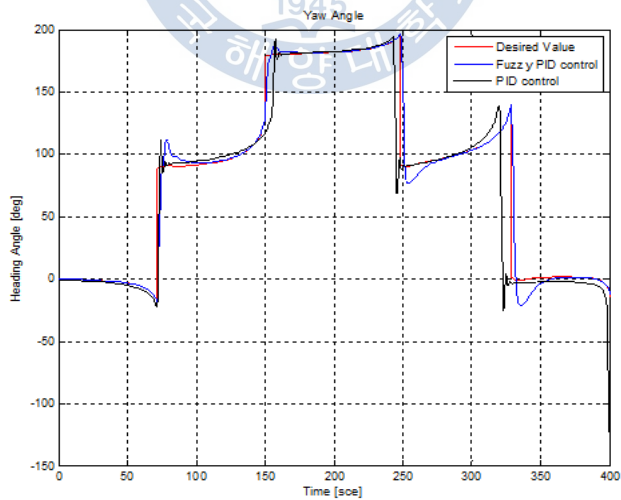


Fig. 21 Result of Heading Angle control

Fig. 22은 잠수정의 속도 제어를 수행한 결과 그래프 이다. 목표 방향각이 변할 때 순간적으로 속도가 줄거나 커지는 현상을 확인 할 수 있는데, 이는 방향각의 제어를 먼저 수행하기 위해 게인값을 방향각 제어값 보다 낮게 설정하였기 때문이라 할 수 있다. Fuzzy PID제어의 경우 목표 속도에 잘 도달 하는 것을 알 수 있고, 방향각이 변하는 경우 생기는 속도의 감소도 PID 보다 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

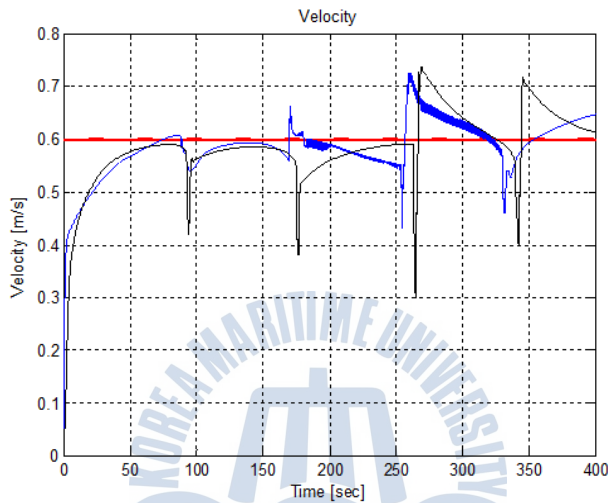


Fig. 22 Result of Velocity control

Fig. 23는 추력분배 방법을 통해 각각의 제어를 위해 필요한 추력을 나타내며, Fig. 24은 추진기에 추력을 얻기 위해 인가해야하는 입력 전압을 나타낸다.

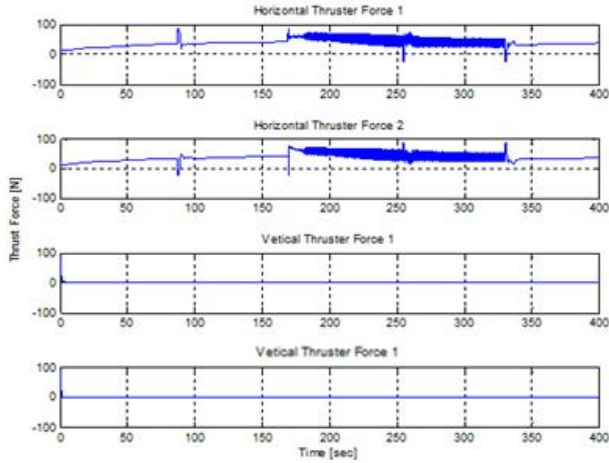


Fig. 23 Thrust force through controller

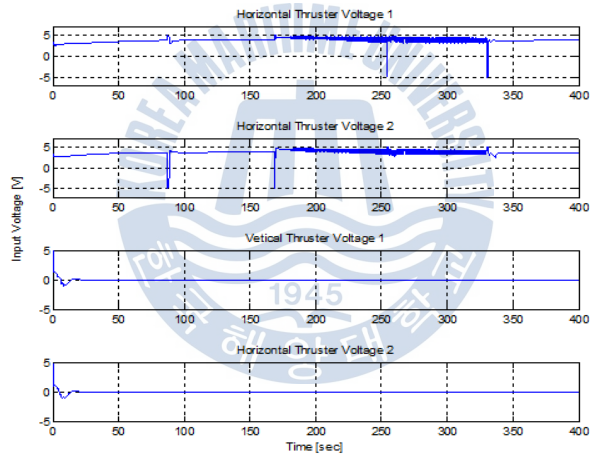


Fig. 24 Input Voltage for thrust control

본 장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 잠수정의 운동과 제어기의 성능을 확인하였다. 설계된 Fuzzy PID 제어기는 오버슈트, 정상상태오차 등을 비교했을 때, 일반적인 PID 제어기보다 좋은 성능을 나타내지만 Fuzzy 제어규칙 또는 Membership Function에 따라 제어성능이 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 추진기 분배법칙을 이용하여 제어에 필요한 추진기의 추력을 적절하게 분배 할 수 있는 것을 알 수 있었다.



## 제 3 장 Hovering type AUV 설계 및 제작

본 논문에서 설계된 무인잠수정은 Hovering Type AUV의 기초적인 운동성능 확인과 제어실험을 위한 Test-bed로써 잠수정의 수중항법시스템 또는 알고리즘 개발을 연구하기 위한 목적으로 설계 및 제작 되었다.

### 3.1 설계 목표

무인잠수정은 사용목적에 따라 형상 및 작업수심, 주행속도, 적재하중 등을 결정하게 된다. 따라서 본 논문에서 설계된 무인잠수정의 조건은 다음과 같다.

첫째, 형태는 Open-frame 구조로 한다.

둘째, 무인잠수정의 총 무게는 50kgf 이내로 한다.

셋째, 내압용기는 작업수심을 견딜 수 있도록 하며, 방수가 가능하도록 설계 한다.

넷째, 실험 및 운용이 용이 하도록, 외각프레임의 외각 크기는 800mm 이내 로 설계한다.

다섯째, 무인잠수정의 운용 시간은 최대 3시간으로 센서 및 배터리 용량을

결정한다.

상기와 같은 설계 조건을 설정한 후, 개념 설계한 무인잠수정은 Fig. 25 와 같다. Fig. 25와 같이 설계된 무인잠수정은 수직 및 수평 추진기를 각 2대 사용하여, 4자유도의 운동을 제어하도록 설계하였다. 또한 내압용기는 원기둥의 모양으로 하며, 잠수정 상부에 부력재를 설치 할 수 있도록 하였다.

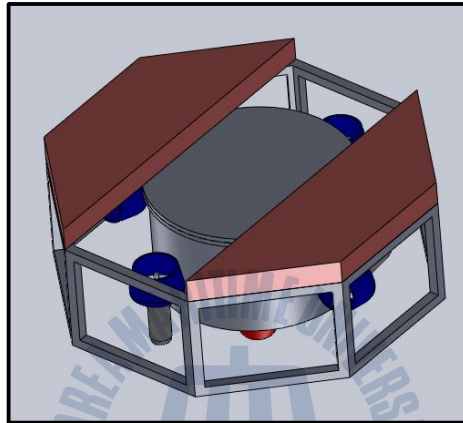


Fig. 25 Concept of Hovering AUV

Table 12는 설계된 잠수정의 제원을 나타낸다.

**Table 12** Parameters and Specifications of Hovering AUV

| Parameter | Specification                    |
|-----------|----------------------------------|
| 선형        | Open-frame                       |
| 제원        | 736 x 736 x 600 [L x W x H] [mm] |
| 질량        | 50kg                             |
| 작업수심      | 10m                              |
| 추진기       | 350watt x 4개 (수직2개, 수평2개)        |
| 제어모드      | 4-DOF 운동제어                       |
| 통신        | RS-232, wifi                     |
| 제어 보드     | On-board PC, DAQ board           |
| 배터리       | 25.7V-6.6Ah 리튬폴리머 x 6EA          |
| 항해센서      | Pressure sensor, DVL, TCM5       |

설계된 무인 잠수정의 작업수심은 실험 환경을 고려하여 10m로 설정 하였다. 또한 추진기의 정격전압과 제어보드, 항해센서의 소비전력을 고려하여 리튬폴리머 배터리의 개수를 결정하였다.

### 3.2 Hovering type AUV 상세 설계

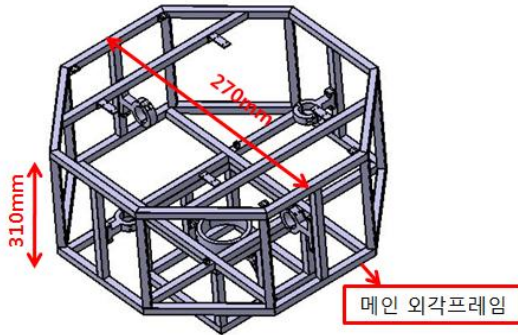


Fig. 26 3D Model of Outer Frame

Fig. 26에 나타난 외각프레임은 Stainless steel 재질을 사용하였으며, 용접구조물 형태이다. 또한 외형은 8각형 형태이며 프레임에 설치될 내압용기의 크기와 추진기의 크기를 고려하여 폭은 270mm, 높이는 310mm으로 설계 하였다.

Fig. 27는 외각프레임을 정면에서 본 그림이다. 프레임의 전체 높이는 506mm이며, DVL을 보호하고 부착하기 위한 프레임은 메인프레임 아래쪽에 위치하도록 설계하였다. 추진기 및 DVL을 고정하기 위한 Bracket은 알루미늄 재질이며 표면처리를 통해 부식방지를 하였다.

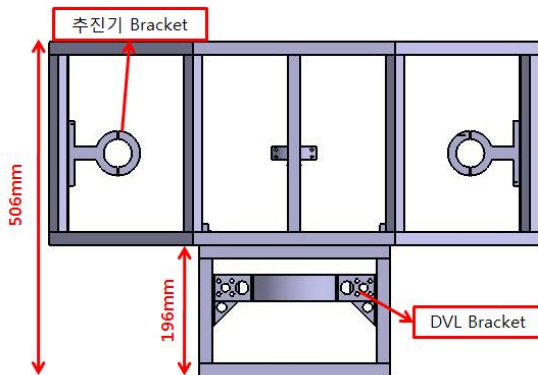


Fig. 27 3D Model of Outer Frame

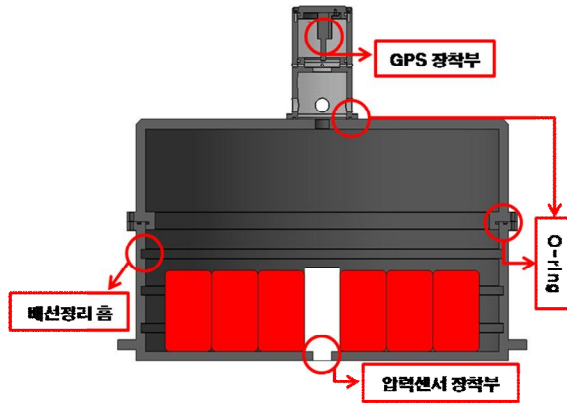


Fig. 28 Pressure Container

Fig. 28는 설계된 내압용기의 단면을 나타낸다. 수중에서 운동하는 잠수정의 경우 배터리 및 전장부를 해수로부터 보호하기 위해 수밀구조를 가져야한다. 따라서 그림에 나타난 것과 같이 내압용기는 상부 및 하부가 O-ring을 이용하여 방수를 하도록 설계 되었으며, 볼트를 이용하여 결합하게 된다. 또한 재질은 알루미늄이며, 표면처리를 통해 부식을 방지하였다. 내압용기는 좁은 공간에 센서 전원 및 신호선, 배터리선 등 배선을 정리하기 매우 까다롭다. 따라서 내압용기 하부에 배선을 정리 할 수 있는 홈을 가공하도록 설계 하였다.

상부에 장착된 GPS용 내압용기는 알루미늄일 경우 데이터의 송수신이 불가능하기 때문에 아세탈 재질로 선정하였다. 마찬가지로 O-ring을 사용하여 수밀하는 구조를 가진다.

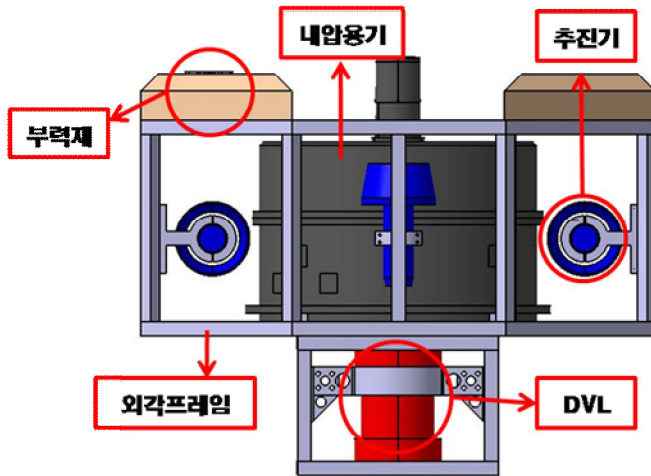


Fig. 29 3D Model Assembly

Fig. 29는 설계된 잠수정의 조립도면 이다. 하부에 DVL이 장착되고, 중간에는 추진기 및 내압용기가 설치된다. 또한 압축 스티로폼을 이용하여 음성부력이던 잠수정을 실험하기 용이하도록 약간의 양성부력이 되도록 설계하였다.

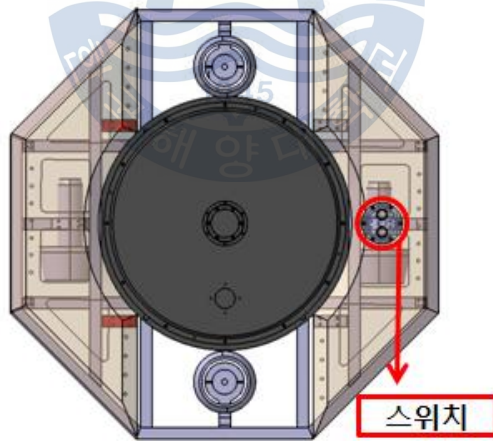


Fig. 30 Top view of Hovering AUV

Fig. 30는 설계 된 무인잠수정의 위에서 본 그림이다. 그림에 표시된 스위치는 외부에서 PC 및 전원 보드에 전압을 인가하기 위한 On/Off 스위치이다.

### 3.3 내압용기 및 외각프레임의 내압해석

설계된 내압용기는 배터리, 센서 및 전장부를 보호하는 역할을 함으로 수중에서 작용하는 수압을 견뎌야하는 필요성이 있다. 따라서 잠수정의 목표 운용 수심인 10m에서 설계된 내압용기의 내구성을 알아보기 위해 정적인 상태에서 응력 분포를 유한요소 해석 하였다. 해석은 ANSYS ver. 13.0 프로그램을 사용하여 수행하였다. 본 논문에서는 내압용기 및 외각프레임에 대한 내압해석 및 좌굴해석을 수행하였다. 하지만 내압용기의 경우 좌굴에 대한 해석은 수행하지 않았다. 그 이유는 좌굴은 내압용기의 길이가 횡단면의 치수에 비해 클 때 일어나는 현상을 말하는데 본 연구에서 설계된 내압용기는 횡단면의 치수가 높이보다 크기 때문에 좌굴해석을 수행할 필요가 없다고 판단하였다.

#### 3.3.1 내압용기 모델링 및 경계조건

해석을 위하여 설계된 내압용기는 Fig. 31와 같다. 내압용기의 외경은 400mm, 내경은 380mm, 높이 260mm 이다. Fig. 32는 내압용기의 형상 모델링과 격자생성, 경계조건을 적용한 것을 나타낸다. 내압용기의 한쪽 면은 병진 및 회전에 대한 자유도를 구속하며, 외부로부터 압력이 고르게 10bar (1Mpa)가 작용한다. Table 13은 실린더 재질인 알루미늄 합금 6061-T6의 물성치를 나타낸다. (ASME, 2013)

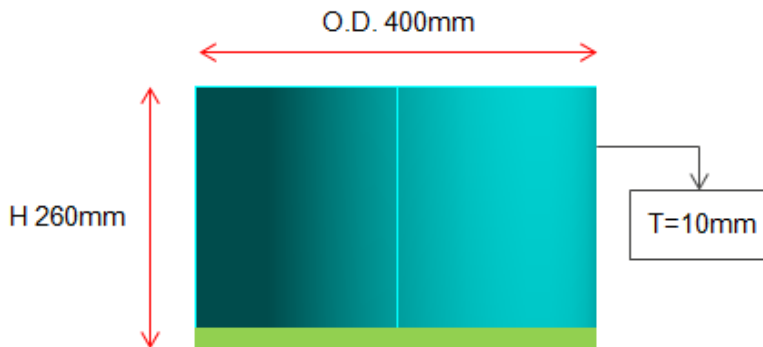


Fig. 31 3D Modeling

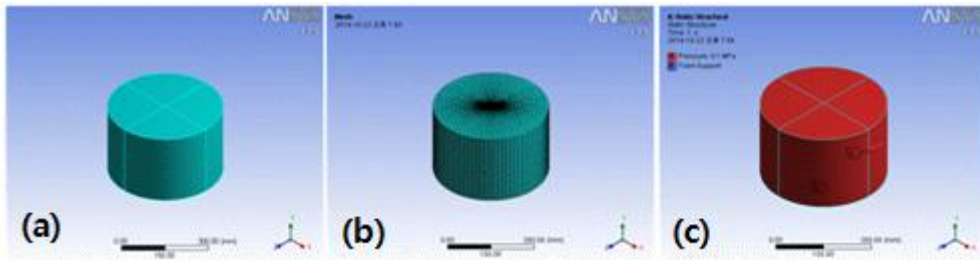


Fig. 32 (a) Geometry, (b) FE modeling, (c) boundary condition of pressure container

Table 13 Material property of aluminum alloy 6061-T6

| Property              | Value                  |
|-----------------------|------------------------|
| Material              | Aluminum alloy 6061-T6 |
| Density               | 2.70g/cc               |
| Modulus of Elasticity | 69GPa                  |
| Poisson's Ratio       | 0.33                   |
| Element Type          | Shell 181 (4 node)     |



### 3.3.2 내압용기 압력 해석 결과

정적해석은 변위와 von Mises stress를 구하여 안정성을 평가하였다. von Mises stress는 물체 각 지점에서 응력 성분들에 의한 비틀림 에너지의 크기를 나타내는 값으로 가장 정확하게 물체의 파괴를 예측하는 기준으로 알려져 있다. Fig. 33은 변위에 대한 해석결과이며 실제 물체가 변형될 형상을 나타낸다. 해석결과 최대 변위는 0.000273mm로 거의 변화가 없다고 판단할 수 있다.

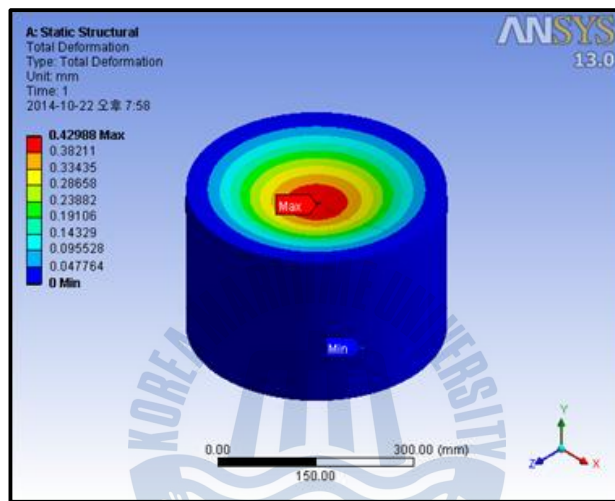


Fig. 33 Distribution of deformation

Fig. 34는 von Mises stress에 대한 해석결과이며 실제 변형 형상을 나타낸다. 알루미늄 합금 6061-T6의 허용응력  $S_a$ 는 121MPa이고 요소가 Shell 요소이기 때문에 응력 한계치는  $P_m + P_b < 1.5 \times S_a$ 가 된다. 따라서 응력 한계치는  $1.5 \cdot 121\text{MPa} = 181.5\text{MPa}$  된다. 내압용기에 작용하는 최대 응력은 22.174MPa이며, 이는 허용응력 한계치보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 설계된 내압용기는 안전하다고 판단할 수 있다.

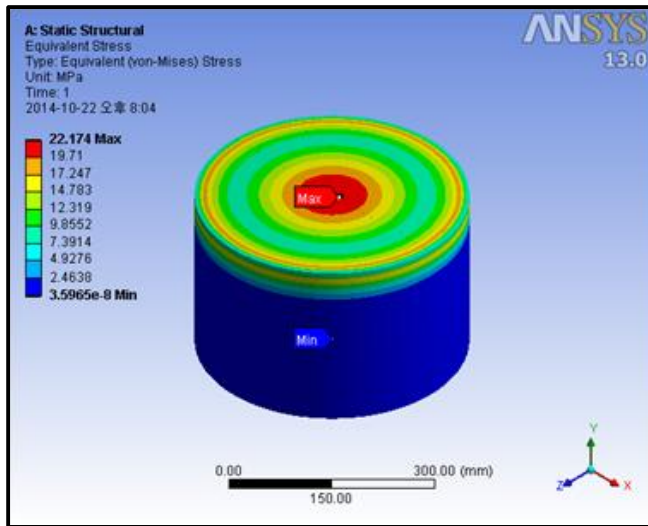


Fig. 34 Distribution of von Mises stress

### 3.3.3 외각프레임 경계조건

내압용기와 마찬가지로 외각프레임에 대한 내압해석을 수행하였다. SUS304 재질로 설계된 프레임은 전체 구조물보다 단일 프레임이 압력에 대하여 더 약할 것으로 판단하여 가장 긴 단일 프레임에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 35은 해석을 위하여 설계된 단일프레임을 나타내며 길이는 270mm, 폭 20mm, 두께는 1.5mm 이다.

Fig. 36는 단일 프레임의 형상 모델링과 격자생성, 경계조건을 적용한 것을 나타낸다. 내압용기 해석과 마찬가지로 한쪽 단면을 구속하여, 외부로부터 압력을 고르게 받도록 하였다.

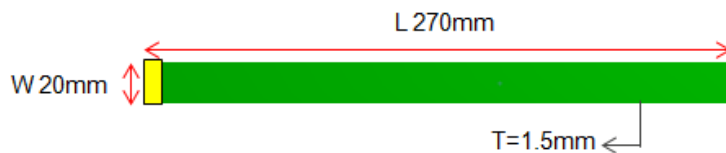


Fig. 35 Design model of outer frame

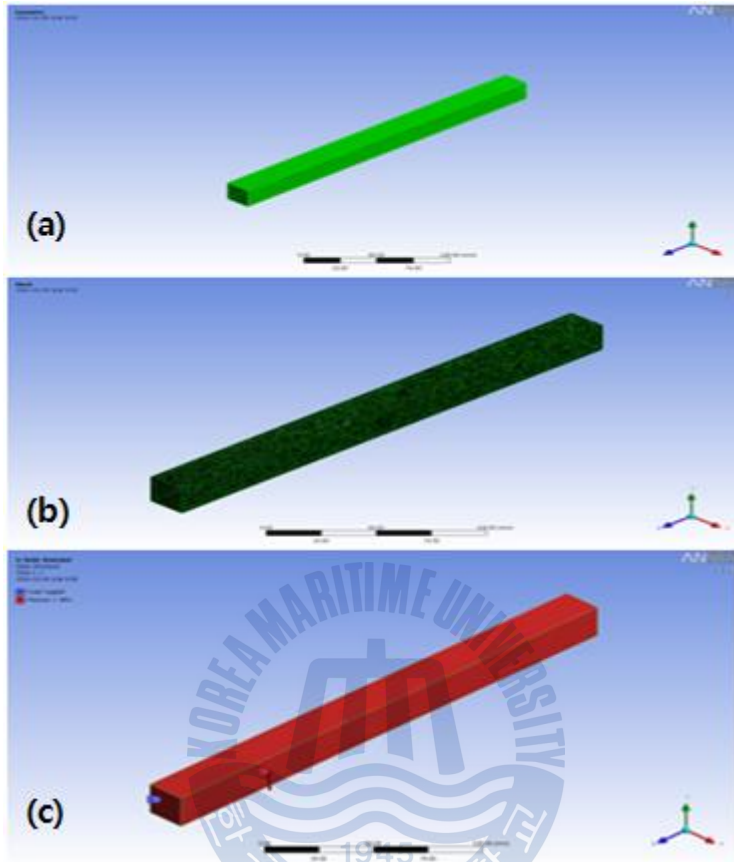


Fig. 36 (a) Geometry, (b) FE modeling, (c) boundary condition of outer frame

Fig. 37 ~ Fig. 38는 작용하는 응력과 길이변화에 대한 해석 결과를 나타낸다.

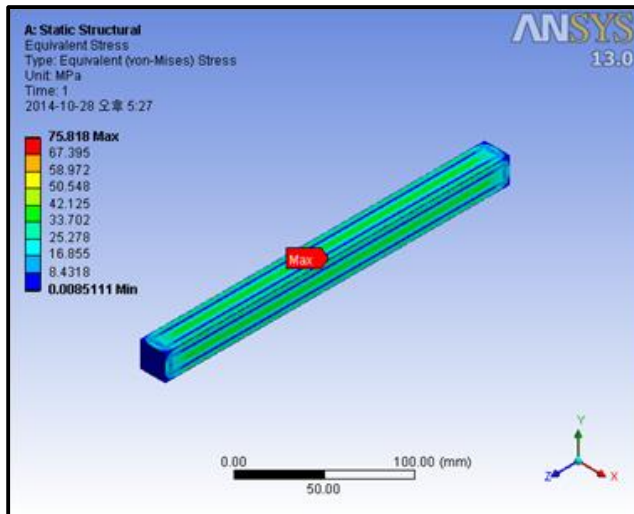


Fig. 37 Distribution of von Mises stress

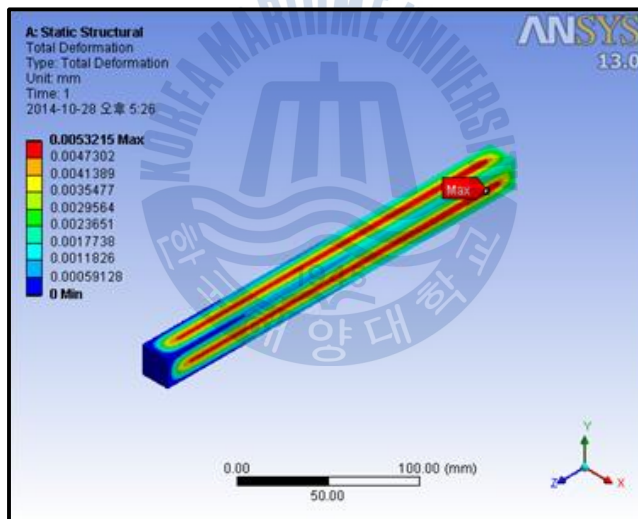


Fig. 38 Distribution of deformation

해석결과 단일 프레임에 작용하는 최대 응력은 75.818MPa 이며, 이때 최대 로 일어나는 변형은 0.0053215mm 인 것으로 확인되었다. 따라서 허용응력 129.448MPa 보다 작은 응력이 작용함으로 안전하다고 판단 할 수 있고, 길이의 변형도 거의 없는 것을 확인 할 수 있다.

외각프레임은 내압용기와 다르게 길이가 횡단면의 치수에 비해 크므로 좌굴 해석도 필요하다. 좌굴 모드 차수는 10까지 해석하였으며, 해석 결과는 Table 14와 같다.

**Table 14** Buckling Pressure

| Mode Number | Buckling Pressure |
|-------------|-------------------|
| 1           | 41.387 MPa        |
| 2           | 41.387 MPa        |
| 3           | 346.92 MPa        |
| 4           | 346.92 MPa        |
| 5           | 502.04 MPa        |
| 6           | 502.04 MPa        |
| 7           | 508.92 MPa        |
| 8           | 508.92 MPa        |
| 9           | 520.11 MPa        |
| 10          | 520.11 MPa        |

해석 결과표와 같이 처음 좌굴이 발생하는 압력은 41.387 MPa 이다. 따라서 설계 수심 10m에서 프레임에 작용하는 외압은 1 MPa로 좌굴에 대한 안정성을 가진다고 판단 할 수 있다. Fig. 39 ~ Fig. 42는 좌굴 모드 차수 1 ~ 4까지 단일 프레임에 좌굴이 일어났을 때의 모습을 나타낸다.

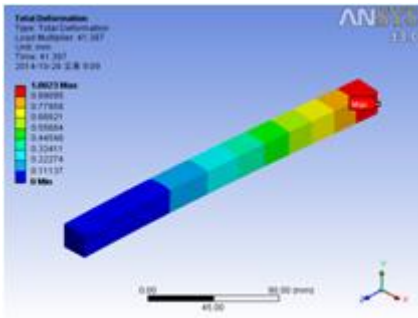


Fig. 39 1st Buckling Pressure

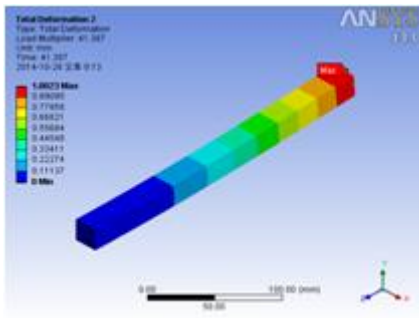


Fig. 40 2nd Buckling Pressure

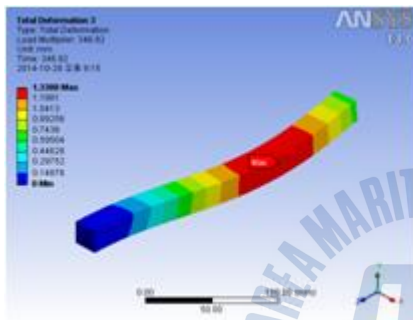


Fig. 41 3rd Buckling Pressure

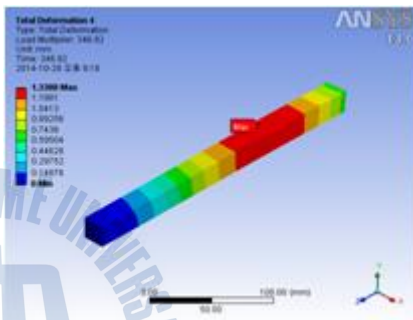


Fig. 42 4th Buckling Pressure

앞 절에서 설계된 내용을 바탕으로 실제 제작된 무인잠수정의 구성 품들은 Fig. 43 ~ Fig. 46에 나타나있다.



Fig. 43 Outer Frame



Fig. 44 Pressure container

Fig. 43는 실제 제작된 외부 프레임을 나타낸다. 각각의 단일 프레임은 용접을 하여 구조물을 형성하였고 프레임에는 추진기와 DVL을 고정하기 위한 bracket이 설치되어 있다.

Fig. 44에 나타난 내압용기는 상·하 구조로 되어있다. 하부 내압용기의 외부에는 방수커넥터가 위치하고 내부에는 배터리 및 전장부가 구성되어있다. 상부

에는 GPS 하우징이 중간에 위치하며 통신을 위한 안테나가 위치한다. O-ring을 통해 방수하는 내압용기는 방수테스트를 통해 수밀이 되는 것을 확인하였다.



Fig. 45 Hardware configuration

Fig. 45는 내압용기 내부에 구성된 전장부를 나타낸다. 전원분배보드는 PC 및 각종 센서에 전원을 인가하기 위한 장치이며, DC-DC Converter로 구성되었다. 전장부 아래는 배터리가 위치하게 된다.



Fig. 46 Switch housing



Fig. 46는 스위치 하우징을 나타낸다. 스위치는 Push-button 두 개와 릴레이로 구성되어 있으며, 전원분배보드를 On/Off 해주는 버튼과 PC 전원을 On/Off 하는 버튼으로 구성되어 있다.

Fig. 47 ~ Fig. 48은 무인잠수정의 조립된 사진을 나타낸다.



Fig. 47 Top view of Hovering AUV

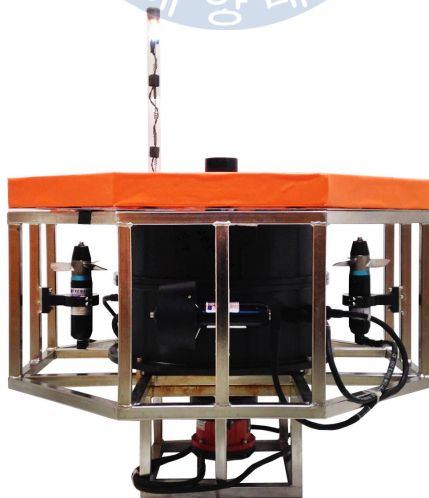


Fig. 48 Side view of Hovering type AUV

### 3.4 하드웨어 구성

#### 3.4.1 추진기

Hovering type AUV는 다수의 추진기를 제어하여 원하는 운동을 수행한다. 본 논문에서는 수평추진기로 Tecnadyne 사의 Model 300을 사용하였고, 수직 추진기로 동일 회사의 Model 280을 사용하였다. Fig. 49 ~ Fig. 50는 사용된 추진기의 모습이다. 추진기는 Table 15 ~ Table 16와 같이 입력전압은 24V~15V이며 모터드라이버는 독립된 12V의 전압이 인가된다. 또한  $\pm 5V$  아날로그 제어명령으로 전·후진 추력을 발생한다. Model 300 추진기의 용량은 최대 350watt이며 전진 추력 7.7kgf 후진 추력 3.2kgf의 추력을 갖는다. Model 280의 경우 전·후진 동일한 6.1kgf의 추력을 갖는다.

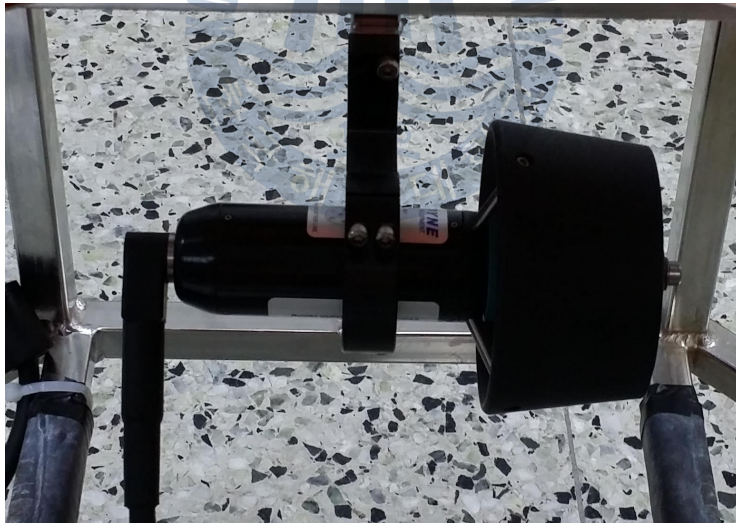


Fig. 49 Tecnadyne Model 300 Thruster

**Table 15** Specification of Model 300

| Parameter      | Specification   |
|----------------|---|
| Bollard Output | Forward - 7.7kgf<br>Reverse - 3.2kgf  |
| Input Voltage  | 24V~150V - Main power<br>12V - Instrument Power<br>-5V ~ +5V - Analog Speed Control |
| Weight         | 1 ~ 1.4 kg -In air<br>0.8 ~ 1.3kg - In water  |
| Depth Rating   | 850m  |



**Fig. 50** Tecnydyne Model 280 Thruster

**Table 16** Specification of Model 300

| Parameter      | Specification                    |
|----------------|----------------------------------|
| Bollard Output | Forward - 6.1kgf                 |
|                | Reverse - 6.1kgf                 |
| Input Voltage  | 24V~150V - Main power            |
|                | 12V - Instrument Power           |
|                | -5V ~ +5V - Analog Speed Control |
| Weight         | 0.9 ~ 1.3 kg -In air             |
|                | 0.8 ~ 1.3kg - In water           |
| Depth Rating   | 850m                             |

### 3.4.2 센서

잠수정의 제어를 위해서는 잠수정의 상태 값을 측정하는 센서들이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 수심을 측정할 수 있는 압력센서, 잠수정의 위치를 알기위한 GPS 및 DVL 그리고 잠수정의 방향을 측정하는 TCM3를 사용하였다.

Fig. 51는 압력센서를 나타낸다.

압력센서는 Sensor system 사의 PSCE0.5BCIG 모델을 사용하였다. 이 센서는 0.5bar(5m) 범위까지 측정이 가능하며 수심에 따라 1V ~ 5V의 출력을 나타낸다.



**Fig. 51** Pressure Sensor

Fig. 52는 잠수정의 방향에 대한 정보를 얻기 위해 사용된 Gyrocompass 이다. 사용된 센서의 모델은 PNI사의 TCM3이며, 3축의 각도 정보를 제공한다. 측정되는 Roll, Pitch, Yaw 각의 정확도는 정지상태에서  $0.5^{\circ}$  이며, 센서 분해도는  $0.1^{\circ}$  이다.



Fig. 52 Magnetic compass

Fig. 53는 수상에서 잠수정의 위치정보를 얻기 위해 사용되는 GPS이다. GPS는 Asecn Korea사의 GPS680 모델을 사용하였다. 센서의 정확도는 3m 이내이며, USB 타입으로 되어 PC에 연결하여 별도의 작업 없이 바로 사용할 수 있다.



Fig. 53 GPS sensor

Fig. 54는 수중에서 사용할 수 없는 GPS를 대신해 잠수정의 위치를 측정하는 DVL이다. 이 센서는 LinkQuest사의 NavQuest 600 Micro DVL로 작동 주파수는 600kHz이며, Surge, Sway, Heave속도를 제공한다. 하지만 DVL의 경우 계측 값인 속도를 적분하여 사용하기 때문에 시간이 지남에 따라 적분 오차가 누적되는 단점이 있다. 따라서 일정 시간 이후 잠수정은 부상하여 GPS 정보를 활용하여 위치를 보정할 필요성이 있다.



Fig. 54 DVL sensor

위의 센서들의 정보를 수집하고 중앙처리장치인 PC에 전송하는 역할을 하는 DAQ 보드는 아래 Fig. 55 ~ Fig. 56에 나타나 있다.



Fig. 55 DAQ board

Fig. 55는 압력센서의 측정값을 얻기 위해 사용하는 다기능 데이터 수집 장치이다. 아날로그 입력 포트8개를 가지고 있다. 최대전압범위는  $-10V \sim 10V$  이며, 정확도는  $7.73mV$ 이다.

Fig. 56는 National Instruments사의 모델 NI-9264이다. 추진기의 제어를 위해 사용되었다. 총 16개의 아날로그 출력포트를 가지고 있으며, 범위는  $-10V \sim 10V$ 이다.

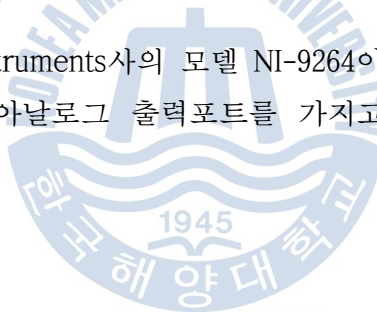


Fig. 56 DAQ board

Fig. 57는 수집된 데이터를 수집하고 처리하는 중앙처리 장치 역할을 하는

PC 보드이다. 일반적으로 사용하는 보드에 비해 크기가 작은 Mini-ITX(17cm x 17cm)로 선정하였고, CPU는 Intel Core i5, RAM은 4G DDR3 2개를 사용하였다. 또한 PC 하드는 삼성 SSD를 사용하였다.



Fig. 57 On board PC

Fig. 58는 무인잠수정의 시스템 흐름을 블록다이어그램으로 나타낸 것이다. Fig. 58를 보면 외부 Host-PC에서 무선통신을 통해 제어 명령을 하고, 각 센서는 RS-232통신을 통해 계측 값을 전송하게 된다. 압력센서와 추진기의 경우 DAQ보드를 통해 아날로그 신호를 입력 또는 출력하여 수집된 정보를 제공하거나 추진기를 제어하게 된다.



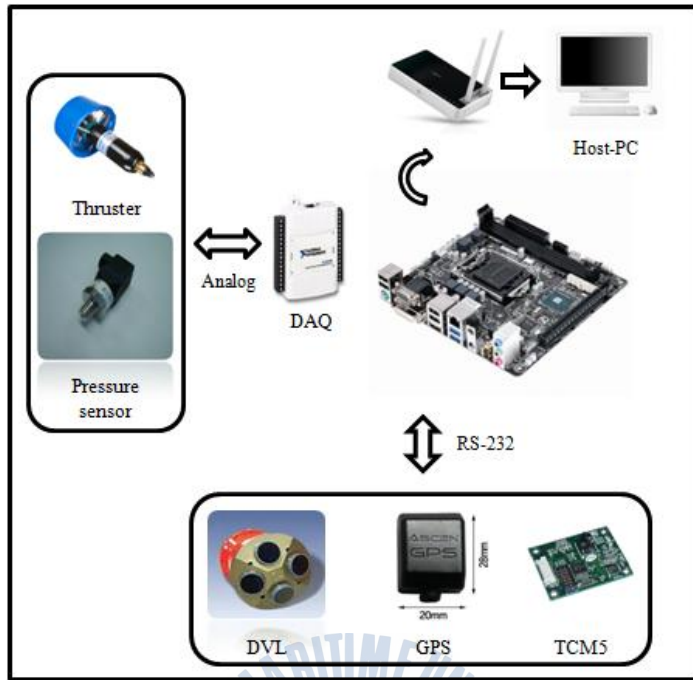
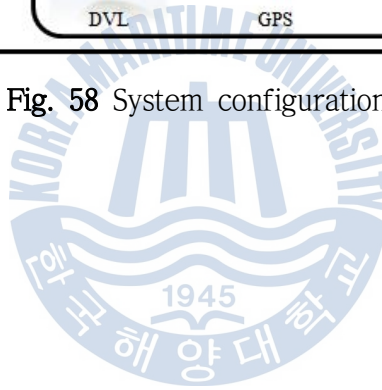


Fig. 58 System configuration



## 제 4 장 실패역 성능 시험

설계된 무인잠수정의 운동성능 확인과 제어기 성능 확인을 위해 실패역에서 실험을 수행하였다. 본 논문에서 수행한 실패역 실험의 최종 목표는 일정한 수심을 유지하면서 주어진 목표점을 지나 시작점으로 돌아오는 경유점 제어이다.

경유점 제어는 앞 장에서 설계된 PID 제어기와 기본적인 LOS(Line Of Sight) 방법을 이용하였으며, DVL 센서를 이용하여 잠수정의 위치를 계산하고 TCM5를 이용하여 방향각 제어를 수행하였다. 실패역 실험은 한국 해양대학교에 위치한 계류장에서 수행하였으며, Fig. 59와 같다.

경유점 제어를 수행하기 이전에 수심방향의 운동 제어 및 목표 방향각을 잘 추종하는지에 대한 방향각 실험을 수행하였다. 이 장에서는 각각의 실험에 대한 결과 그래프를 보이고 해석하였다.



Fig. 59 Field test site

## 4.1 수심제어

Fig. 60은 수심제어를 수행한 후 결과 그래프를 나타낸다. 목표수심은 1m로 설정하였으며 100초 이후 수면으로 부상하는 잠수정의 수심방향 경로를 확인할 수 있다. 초기에 잠수정이 수심방향의 운동을 하는 동안 관성에 의해 오버슈트가 발생하는 것을 확인 할 수 있고, 약 10초 이후 정상상태에 도달하는 것을 확인 할 수 있다. 조류에 의해 진동을 보이지만 그 크기가 크지 않고 목표 수심을 잘 추종하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 61은 수심제어를 수행하기 위해 추진기에 입력된 전압을 나타낸다.

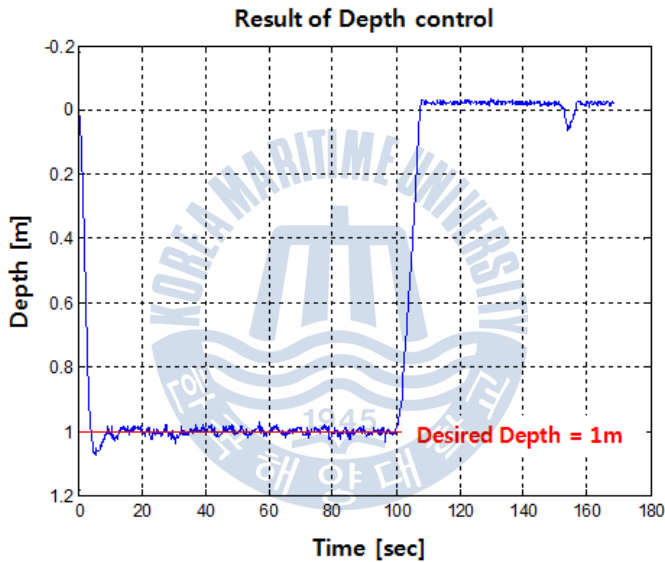


Fig. 60 Result of Depth control

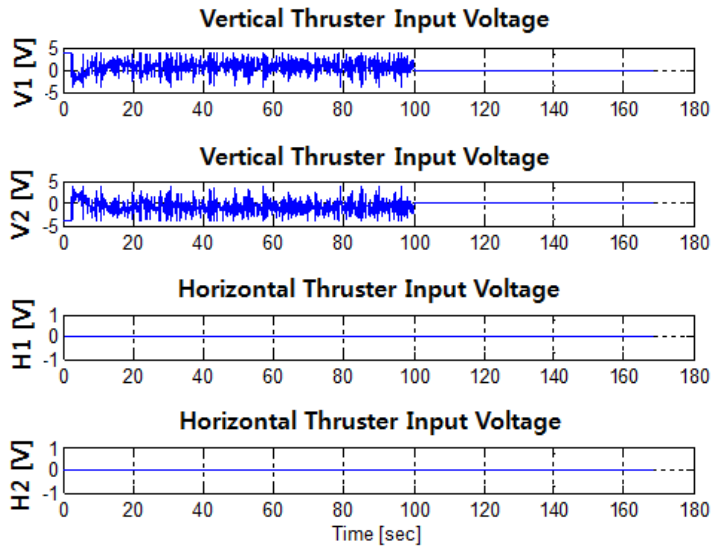


Fig. 61 Thrust Input Voltage for Depth control

## 4.2 방향각 제어

Fig. 62는 방향각 제어에 대한 결과 그래프를 나타낸다. 초기에 잠수정은 방향각은  $50^\circ$  를 나타내고 있고, 이후 첫 번째 목표 방향각인  $-90^\circ$  에 수렴하는 것을 알 수 있다. 약 20초, 35초 후 목표 방향각은  $0^\circ$  와  $90^\circ$  로 설정하였으며 약간의 오버슈트를 가지고 이후 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

Fig. 63은 방향각제어를 위해 수평추진기에 인가된 구동 전압을 나타낸다.

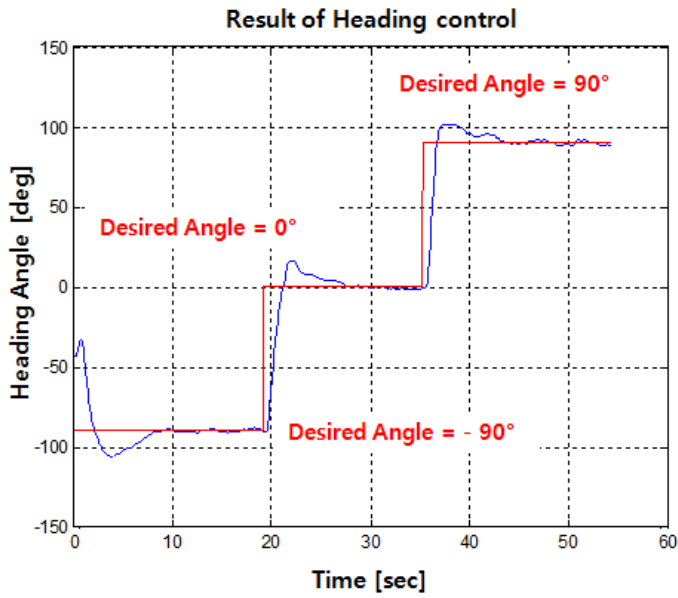


Fig. 62 Result of Heading control

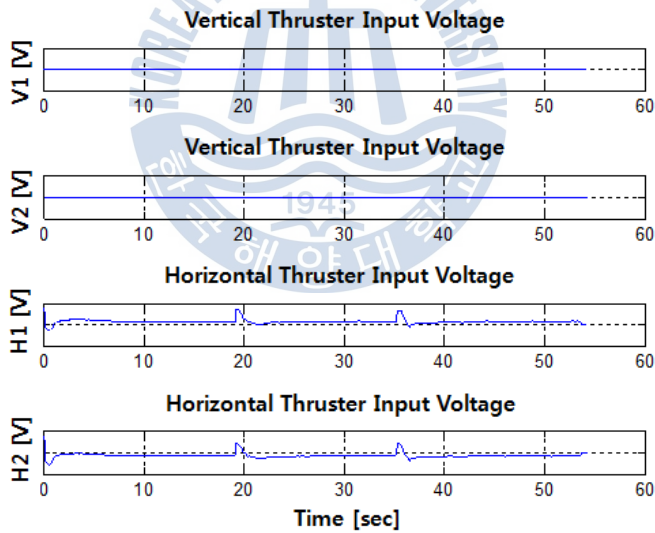


Fig. 63 Thrust Voltage for Heading control

### 4.3 경유점 제어

본 연구에서 수행한 경유점 제어는 (0,0,0)을 시작점으로 주어진 경유점을 돌아 시작점으로 회귀 할 수 있도록 설정하였다. Fig. 64은 DVL 센서에서 측정되는 잠수정의 속도를 적분하여 잠수정의 이동거리를 나타내며, 잠수정의 X-Y평면의 경로를 나타낸다. 잠수정의 운동을 고려하여 정확한 경유점에 도달하는 것이 어려움으로 유효반경( $r = 0.5\text{m}$ )을 설정하여 실험하였다.

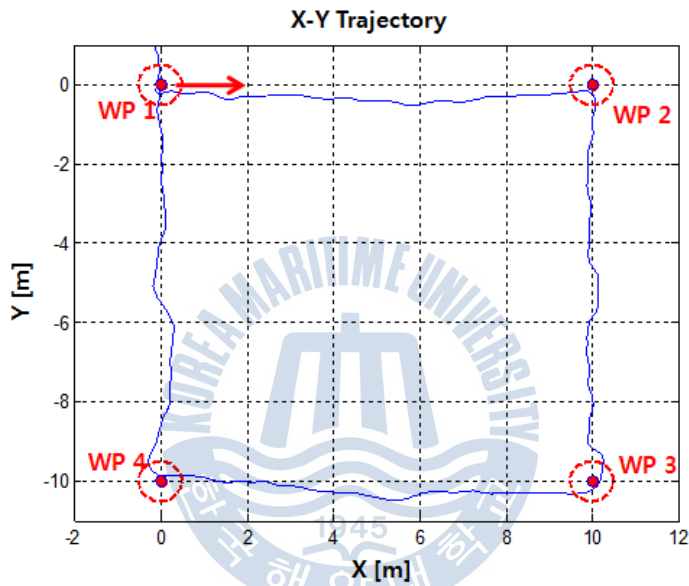


Fig. 64 X-Y Trajectory of Hovering AUV

Fig. 64는 잠수정의 3차원 경로를 나타내는 그래프이다. 초기 잠수정은 수심 방향으로 1m 이동하고, 이후 수심을 유지하면서 주어진 경유점을 돌아 다시 수면으로 부상하는 것을 확인 할 수 있다.

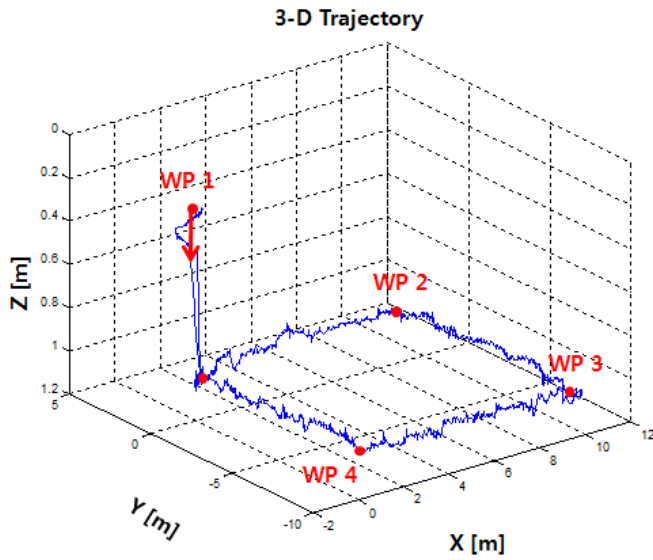


Fig. 65 3-D Trajectory of Hovering AUV

Fig. 66은 경유점 제어를 수행하는 동안 잠수정의 수심방향 제어 결과 그래프를 나타낸다. 목표수심에서 약  $\pm 0.02\text{m}$ 의 진동을 보이며 수심을 유지하는 것을 확인 할 수 있다.

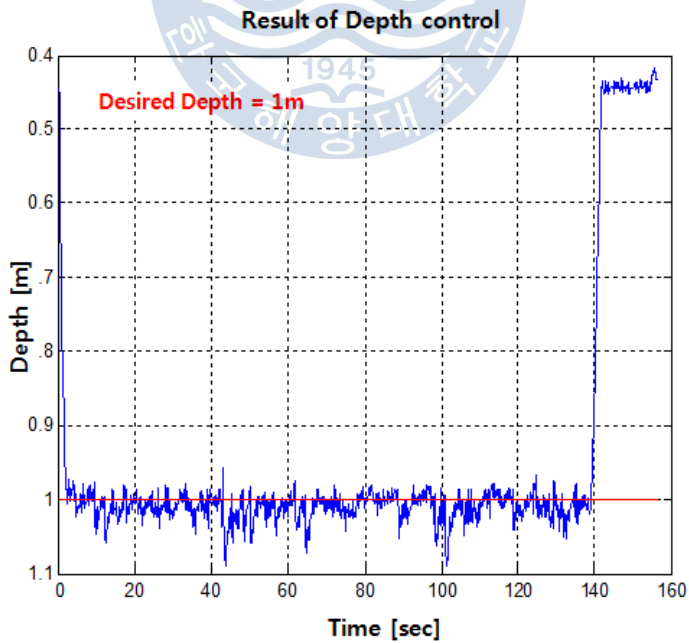


Fig. 66 Result of Depth control

Fig. 67은 LOS방법을 통해 결정된 목표방향각의 변화에 따라 잠수정의 방향 각 변화를 나타낸 그래프이다. 초기 약  $25^\circ$  에서 출발한 잠수정은 첫 번째 경유점으로 이동하기 위해 방향각을 설정한다. 이후 각각의 경유점으로 이동하기 위해 방향각을 설정하고 목표방향각을 잘 추종하는 것을 확인 할 수 있다. 실제 잠수정의 방향각이 진동을 가지는 것을 확인 할 수 있고, 그 크기는 약  $\pm 5^\circ$  이내의 각도를 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

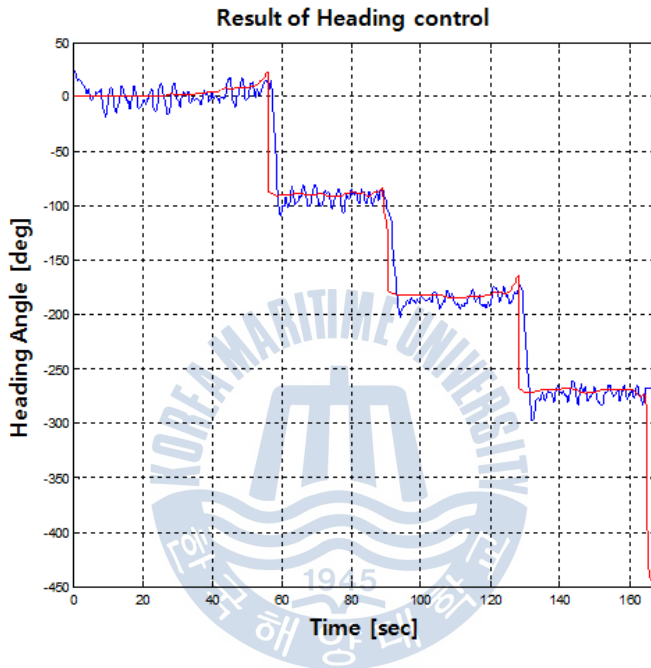


Fig. 67 Heading Angle

Fig. 68은 DVL 센서에서 측정된 잠수정의 속도를 나타낸다. 전진 방향으로 약 0.3m/s를 나타내며, 초기 수심방향의 운동 시 Z축 방향의 속도는 0.25m/s의 속도를 가진다.

Fig. 69는 방향각 센서에서 계측된 잠수정의 상태 값을 나타낸다. 경유점 제어를 수행하는 동안 X축방향의 회전은 약  $0^\circ \sim -2^\circ$  를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Y축방향의 회전을 나타내며 마찬가지로 약  $0^\circ \sim -2^\circ$  가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 각각의 값은 잠수정의 운동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.



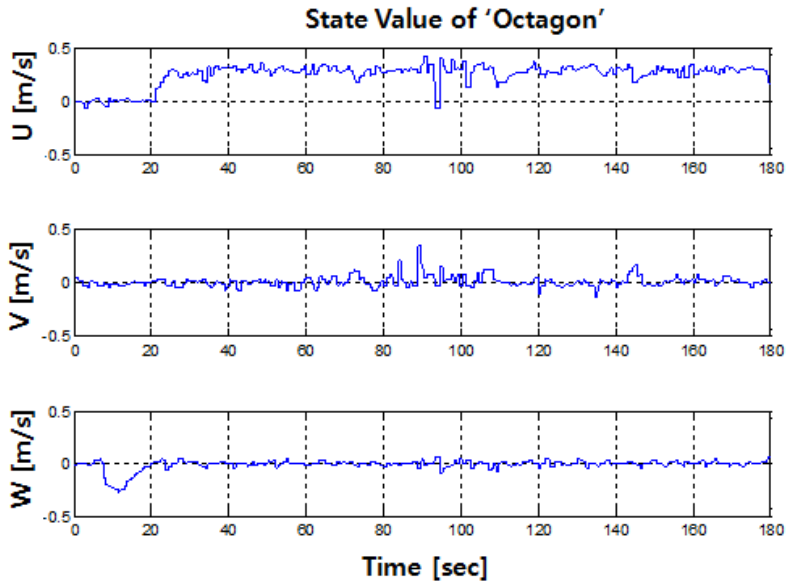


Fig. 68 Velocity of Hovering AUV from DVL

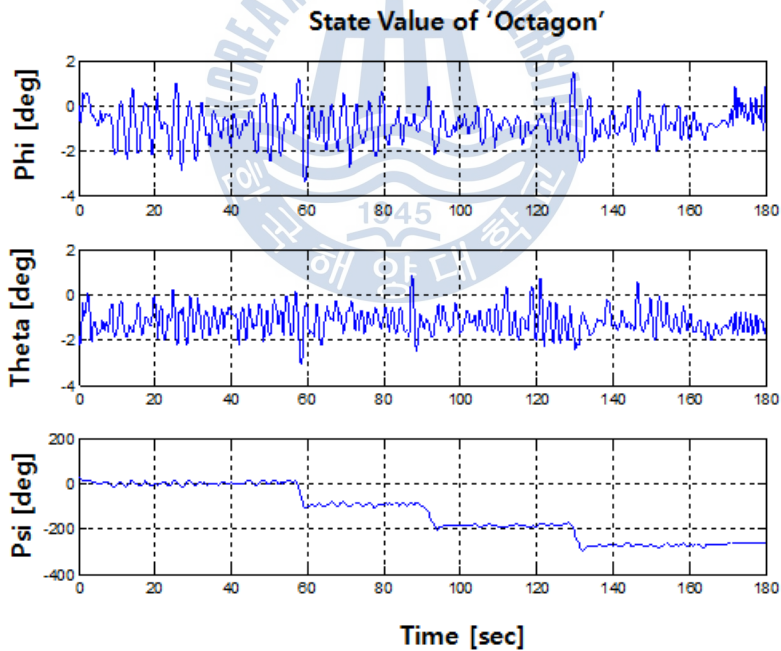


Fig. 69 State Value of Hovering AUV from TCM 5

Fig. 70은 수심제어와 경유점제어를 위해 인가되는 추진기의 입력 전압을 나타낸다. 이 값은 PID 제어기에서 출력된 제어입력 값으로 출력 값은  $-4V \sim 4V$

로 제한하였다.

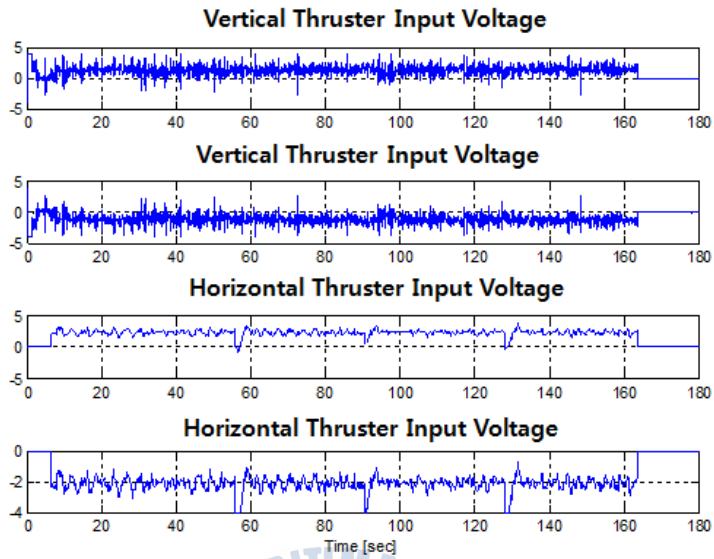
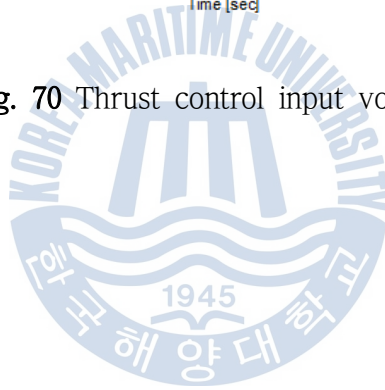


Fig. 70 Thrust control input voltage



## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 Hovering AUV의 자율운항 항법시스템을 연구하기 위하여 On Board-PC와 Labview 프로그램을 이용하여 제어 알고리즘 구현이 쉽게 설계된 Test-bed 용 Hovering Type의 무인잠수정을 설계 및 제작하였다. Open-frame 구조의 무인잠수정은 추후 다양한 센서를 장착하여 테스트 할 수 있도록 설계하였다. 또한 제작된 무인잠수정은 최대 3시간가량 실험 할 수 있도록 리튬폴리머 배터리의 용량을 결정하고 내압용기 내부에 설치하였다.

또한 설계된 잠수정의 제어알고리즘을 확인하기 위하여 수학적 모델링을 이용한 시뮬레이터를 구성하였으며, 설계된 제어기의 성능을 확인하는 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 설계된 PID 제어기와 Fuzzy 논리에 의해 튜닝이 가능한 Fuzzy PID 제어기의 성능을 확인하는 시뮬레이션을 수행하였다.

Hovering 무인잠수정은 다수의 추진기를 이용하여 자세를 제어해야 하기 때문에 각 추진기에 적절한 제어 입력 값을 분배하기 위한 추진기 분배법칙을 적용하였다. 설계된 제어 알고리즘과 항법시스템을 이용하여 제작된 무인잠수정의 운동성능을 확인하는 실험에서 실험을 수행하였으며, 수심제어, 방향각 제어 및 경유점 제어를 수행하였다. 실험에서는 PID 제어기를 이용하였다. 본 논문에서 개발된 무인잠수정은 수평 및 수직 추진기를 각 2대 사용하여 4자유도의 운동을 제어 할 수 있다. 본 논문에서는 방향각 및 수심방향의 제어를 위주로 실험 하였으며, Pitch 또는 잠수정의 속도 제어는 하지 않았다. Pitch 각의 경우 제어하지 않았지만 잠수정의 운동 중에 발생하는 크기가 작아 운동에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단하였다. 본 논문에 나타내지 않았지만 경유점 제어는 매번 수행 할 때 마다 그 결과 그래프가 다르게 나타났으며 이는 잠수정에 작용하는 조류 또는 센서가 가지는 오차에 의한 것으로 판단된다. 또한 잠수정의 이동거리는 DVL의 속도 값을 적분하기 때문에 시간이 지날수록 적분

오차가 증가하는 특성을 가지고 있어서 정밀한 경로의 계측을 위한 필터설계 및 알고리즘 개발이 필요하다고 생각된다.

본 논문에서 수행한 기본적인 무인 잠수정의 운동성능 확인 이외에 향후 설계된 시스템을 이용하여 강인한 제어를 도입하여 실해역의 외란에도 강인하게 제어할 수 있는 제어기 또는 다양한 센서들에 관한 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.



## 참고문헌

- 변승우, “수중탐사용 Hovering AUV의 Test-bed 개발”, 제주대학교 해양시스템공학과 석사학위 논문, 2007.
- 최중락, “무인잠수정 발전 방향”, 국방해양과학기술과 수중로봇 발전방향 포럼, pp.2-60, 2011.
- 최형식, 김준영. “무인잠수정 (AUV) 의 연구개발 현황 및 전망.” 대한조선학회지 49.3 (2012): 25-30.
- Garus, Jerzy, and Józef Malecki. “A control allocation method for over-actuated underwater robot.” Proceedings of the 5th WSEAS congress on Applied Computing conference, and Proceedings of the 1st international conference on Biologically Inspired Computation. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2012.
- Garus, Jerzy. “Optimization of thrust allocation in the propulsion system of an underwater vehicle.” International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 14 (2004): 461-467.
- Gertler, Morton, and Grant R. Hagen. Standard equations of motion for submarine simulation. No. NSRDC-2510. DAVID W TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER BETHESDA MD, 1967.
- Loc, Mai Ba, et al. “Design of Fuzzy PD Depth Controller for an AUV.” International Journal of Ocean System Engineering 3.1 (2013): 16-21.
- MathWorks, Inc, and Wei-cheng Wang. Fuzzy Logic Toolbox: for Use with MATLAB: User’s Guide. MathWorks, Incorporated, 1998.

O.J. Sordelen(1997), Optimum Thrust Allocation for Marine Vessels, Control Engineering Practise, Vol. 5, No. 9, pp. 1223-1231.

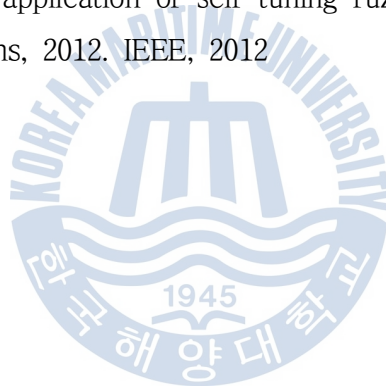
P. Newman, World AUV Market Forecast 2012-2016, Duglas Westwood, 2012.

Prestero, Timothy Timothy Jason. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Diss. Massachusetts institute of technology, 2001.

T I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", Jhon Wiley & Sons, New York, 1994.

Westwood, John. "The AUV market place." Presentation at Oceanology International, London, 10th March (2010).

Zhang, Wei, et al. "The application of self-tuning fuzzy PID control method to recovering AUV." Oceans, 2012. IEEE, 2012



## 감사의 글

우연이 인연이 된지 어느덧 4년이 지났습니다. 무지에서 비롯된 궁금증이 이제는 제 삶에 큰 비중을 차지하는 중요한 일로 바뀌었음을 느낍니다. 연구생 2년 그저 실험실 형들이 좋았고 잠수정을 들고 바다에 가서 실험하는 것이 좋았고 행복 했습니다. 아무 것도 몰라서 무모할 수 있었고 도전할 수 있었던 것 같습니다. 연구생 생활을 마치고 석사과정 2년 여전히 배울 것이 많고, 부족하다는 것을 느꼈습니다. 그래서 방황도 많이 한 것 같습니다. 하지만 분명한 것은 이 시간들은 잊지 못하는 추억이라는 단어로 항상 마음속에 있을 것입니다.

이 글은 지금까지 지내온 시간 중 가장 소중하고 간직하고 싶은 4년을 만들어준 분들에게 올립니다.

먼저, 마냥 놀기 좋아하고 철없던 학생을 연구원생으로 받아주시고 많은 가르침과 저에게는 낯선 일들을 할 수 있는 용기 그리고 일에 대한 책임감을 갖게 해주신 지도교수님인 김준영 교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁘신 가운데 부족한 논문을 심사 해주신 손경호, 유삼상 교수님께도 감사드리며 또한, 연구에 많은 조언과 격려를 해주신 최형식 교수님께도 감사드립니다.

그리고 실험실 생활에 가장 소중한 사람들 동희형, 승우형, 성협이형. 형들한테는 학문적인 것도 많이 배우기도 했지만 진짜 저를 동생으로 생각해주고 칭찬도 꾸짖음도 많이 해주셔서 감사합니다. 늘 부족한 동생이었던 것 같아 죄송하지만, 앞으로 더욱 노력해서 멋진 사람 되겠습니다. 그리고 처음 생긴 실험실에 같이 들어와 석사과정까지 함께한 건석이, 힘든 시기를 같이 보냈기에 건석이와 함께한 시간은 더욱 소중한 것 같고 힘이 되어줘서 고맙다.

실험실 첫 후배 동호, 영진이 성질 급하고 욕하는 형 밑에서 지낸다고 고생 많았고 잘 버텨줘서, 나에게 힘이 되어줘서 고맙고 감사하다.

그리고 친구들...내가 대학원 진학한다고 했을 때 다들 응원해준 그리고 실험실 생활한다는 핑계로 약속도 잘 안 지키고, 연락도 못했지만 항상 응원해주고 힘이 되어준 유진, 진관, 한규, 지훈, 성민, 경환, 윤성, 상현, 현석, 지호 등 거론하지 못한 모든 사람들에게 감사하고 또 감사함을 느낍니다.

끝으로 집에서 철없는 아들 그리고 동생인 내가 하고 싶은 일 묵묵히 할 수 있게 믿어주고 응원해준 나에게 가장 소중한 나의 부모님, 누나에게 진심으로 사랑하고 감사하다고 전하고 싶습니다. 이 글에 미처 언급하지 못한 모든 분들에게 감사하다는 말을 전하며 이 글을 마치겠습니다.

2015년 1월

홍 승 민 올림

## 꽃나무

신영진

산다는 것은  
가슴속에 꽃나무 한 그루를 키우는 것이다.

늘 마음으로야  
보석보다 아름다운 개화를 꿈꾸지만

그의 계절에도 찬바람은 몰아치고  
필연처럼 폭우조차 비껴가질 않는다.

나무가 뽑혀 나갈 때마다 앓는 속병에  
죽어간 나무를 따라가는 자 조차 있지만

사람들은 또 한그루의 나무를 심고  
속앓이로 다져진 인내만큼

튼실해진 나무를 바라보며 오늘도 꿈을 꾸다.  
찬란한 내일을,