

공학석사 학위논문

수중글라이더의 동역학 모델링 및
실해역실험에 관한 연구

A Study on Dynamics Modeling and Field test
for Underwater Glider

지도교수 김 준 영

2014년 12월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

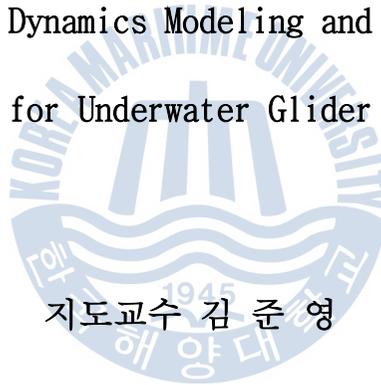
남 건 석



공학석사 학위논문

수중글라이더의 동역학 모델링 및
실해역실험에 관한 연구

A Study on Dynamics Modeling and Field test
for Underwater Glider



지도교수 김 준 영

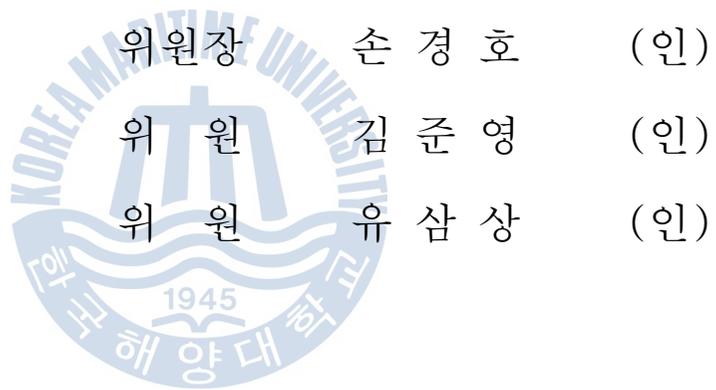
2014년 12월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

남 건 석

本 論文을 南乾錫의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



2014년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|------------------------------|-----|
| List of Tables | vi |
| List of Figures | vii |
| Abstract | xii |
| | |
| 1. 서 론 | |
| 1.1 연구배경 | 1 |
| 1.2 연구목적 | 4 |
| 2. 수중글라이더 외부 설계 | |
| 2.1 수중글라이더 외부구성 | 6 |
| 2.2 수중글라이더 외부설계 | 6 |
| 2.2.1 선수부 설계 | 8 |
| 2.2.2 선미부 설계 | 9 |
| 2.2.3 동체 설계 | 11 |
| 2.2.3.1 좌굴 해석조건 및 경계조건 | 12 |
| 2.2.3.1 동체 내압해석 | 12 |
| 3. 수중글라이더 내부 설계 | |
| 3.1 수중글라이더 내부구성 | 16 |
| 3.1.1 부력엔진 설계 | 17 |
| 3.1.1.1 유압펌프 | 18 |
| 3.1.1.2 부력엔진 피스톤 | 20 |

| | | |
|-----------|----------------------------------|----|
| 3.1.2 | 자세제어기 설계 | 21 |
| 3.1.3 | 전장부 구성 | 23 |
| 4. | 수중글라이더 운동 모델링 | |
| 4.1 | 좌표계의 설정 | 25 |
| 4.2 | 강체의 6자유도 비선형 운동방정식 | 27 |
| 4.3 | 무인 수중글라이더의 6자유도 비선형 운동 모델링 | 30 |
| 4.3.1 | 부력 및 부력중심의 변화 | 30 |
| 4.3.2 | 질량중심 및 질량관성모멘트의 변화 | 34 |
| 4.4 | 유체력 미계수의 추정 | 38 |
| 4.4.1 | VPMM 실험 | 38 |
| 4.5 | 6자유도 비선형 운동 시뮬레이션 및 해석 | 45 |
| 4.5.1 | 시뮬레이터의 구성 | 45 |
| 4.5.2 | PID 제어기 설계 | 46 |
| 4.5.3 | 수직운동 시뮬레이션 | 47 |
| 4.5.4 | 수평운동 시뮬레이션 | 51 |
| 5. | 수중글라이더 실험 | |
| 5.1 | 수조 실험 | 61 |
| 5.2 | 실해역 실험 | 64 |
| 6. | 결론 | 67 |
| | 참고문헌 | 69 |

List of Tables

| | | |
|------------------|---|----|
| Table 1 | Specification of commercial Unmanned Underwater Gliders · | 2 |
| Table 2.1 | Parameters of myring profile for Underwater Glider ······ | 8 |
| Table 2.2 | Analysis case ······ | 12 |
| Table 2.3 | Analysis Conditions ······ | 13 |
| Table 2.4 | Results of buckling analysis ······ | 15 |
| Table 3.1 | Parameters of motor ······ | 22 |
| Table 4.1 | Variable for dynamics modeling ······ | 26 |
| Table 4.2 | Coefficient value of buoyancy piston velocit ······ | 33 |
| Table 4.3 | Parameter for Electric motor ······ | 36 |
| Table 4.4 | Specification of VPMM equipment ······ | 39 |
| Table 4.5 | VPMM test conditions ······ | 40 |
| Table 5.1 | Specification of Underwater Glider ······ | 59 |
| Table 5.2 | Specification of control board ······ | 60 |

List of Figures

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Littoral glider | 3 |
| Fig. 1.2 Slocum glider | 3 |
| Fig. 1.3 Sea glider | 3 |
| Fig. 1.4 Spray glider | 4 |
| Fig. 1.5 Operation concept of underwater glider | 5 |
| Fig. 1.6 Force acting on the glider | 5 |
| Fig. 2.1 External shape of underwater glider | 6 |
| Fig. 2.2 Outer flow velocity distributions | 7 |
| Fig. 2.3 Vehicle hull radius as a function of axial position | 9 |
| Fig. 2.4 Shape of nose cone | 9 |
| Fig. 2.5 Configuration of stern section | 10 |
| Fig. 2.7 Maximum horizontal velocity vs glider size and ballast fraction | 11 |
| Fig. 2.8 Shape of Hull | 12 |
| Fig. 2.9 Boundary condition | 13 |
| Fig. 2.10 Results of buckling mode shapes | 14 |
| Fig. 3.1 Inside composition of underwater glider | 16 |
| Fig. 3.2 Configuration of buoyancy engine | 17 |
| Fig. 3.3 Hydraulic circuit of buoyancy engine | 18 |

| | |
|---|----|
| Fig. 3.4 constitution of piston pump | 18 |
| Fig. 3.5 Performance properties of radial piston | 19 |
| Fig. 3.6 Inner configuration of hydraulic pump | 19 |
| Fig. 3.7 Cross-section of buoyancy engine piston | 20 |
| Fig. 3.8 Buoyancy engine | 20 |
| Fig. 3.9 Configuration of motion controller | 21 |
| Fig. 3.10 Motion controller mechanism | 22 |
| Fig. 3.11 Motion controller | 22 |
| Fig. 3.12 Diagram of control system | 23 |
| Fig. 3.13 Diagram of motion control board | 24 |
| Fig. 3.14 Diagram of power distribution board | 24 |
| Fig. 4.1 The inertial earth-fixed frame and body-fixed frame | 25 |
| Fig. 4.2 Underwater glider coordinate system | 30 |
| Fig. 4.3 The change of volume according to the location of buoyancy engine piston | 13 |
| Fig. 4.4 The change of center of gravity and mass moment of inertia according to the location of inner moving mass | 34 |
| Fig. 4.5 Schematic diagram of VPMM | 38 |
| Fig. 4.6 VPMM test | 39 |
| Fig. 4.7 Right-handed coordinate system for VPMM test | 40 |
| Fig. 4.8 Pure heave motion | 40 |
| Fig. 4.9 Pure pitch motion | 41 |
| Fig. 4.10 VPMM test data | 44 |

| | |
|---|----|
| Fig. 4.11 Block diagram of simulator | 45 |
| Fig. 4.12 PID controller block diagram | 46 |
| Fig. 4.13 Angle of underwater glider when buoyancy piston located neutral point | 47 |
| Fig. 4.14 Underwater glider motion according to buoyancy piston ... | 48 |
| Fig. 4.15 Location of inner moving mass and buoyancy piston | 49 |
| Fig. 4.16 Maximum velocity of underwater glider in Earth coordinate system | 49 |
| Fig. 4.17 Motion controller PID control simulation | 50 |
| Fig. 4.18 Horizontal motion of glider | 51 |
| Fig. 4.19 Trajectory of underwater glider | 51 |
| Fig. 4.20 Heading control of underwater glider | 53 |
| Fig. 4.21 Heading control trajectory | 53 |
| Fig. 4.22 Zig-Zag control of underwater glider | 54 |
| Fig. 4.23 Current disturbance acting on underwater glider | 55 |
| Fig. 4.24 Moving mass location | 56 |
| Fig. 4.25 Heading control in disturbance | 56 |
| Fig. 5.1 Underwater glider | 58 |
| Fig. 5.2 Sensors, control board and communication modems | 59 |
| Fig. 5.3 Water Pool test | 61 |
| Fig. 5.4 Pitch angle control in water pool test | 62 |
| Fig. 5.5 Depth and inner moving mass location | 62 |
| Fig. 5.6 Roll motion in water pool test | 63 |

| | |
|--|----|
| Fig. 5.7 Inner moving mass location when roll motion test | 63 |
| Fig. 5.8 Field test area | 64 |
| Fig. 5.9 Pitch angle in field test | 65 |
| Fig. 5.10 Inner moving mass location in field test | 65 |
| Fig. 5.11 Heading control in field test | 66 |



A Study on Dynamics Modeling and Field test for Underwater Glider

Nam, Keon Seok

Department of Material Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

Generally, underwater gliders do not have separate propellers to move forward. They are driven from propulsive force by difference between their buoyancy and gravity. Also the attitude of a underwater glider is controlled by changing the relative position of the buoyancy center and mass center. The proposed underwater glider in this paper is designed to use an inner buoyancy engine of cylinder-piston type and movable mass controller, with which buoyancy and attitude can be controlled. The buoyancy engine changes the volume of a ballast tank to make a heave motion of the underwater glider. The movable mass, which enables translational and rotational motion, makes a pitch and roll motion of the underwater glider. In this paper, as a basic research of the underwater

glider, we derive nonlinear 6DOF dynamic equations that only consider the kinematic characteristics, such as the location of the movable mass, and the piston of the buoyancy engine. Using these equations, we performed dynamic simulations of the proposed underwater glider, and verified the suitability of the design and a dynamic performance of the proposed underwater glider.

KEY WORDS: Unmanned underwater glider 무인 수중글라이더; Motion control 자세제어; 6-DOF dynamics 6자유도 운동; dynamics simulation 운동 시뮬레이션; Field test 실험역 실험



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 해양환경의 관측과 해양자원의 확보를 위한 해양탐사가 늘어가는 추세이다. 해양환경과 탐사목적에 의해 다양한 방법의 탐사방법이 필요하며 또한 탐사를 효율적으로 수행하기 위한 탐사장비개발의 필요성이 늘어가고 있다. 특히 해양탐사지역의 환경이 인간이 접근하기 힘든 곳으로 점점 영역을 확대해가고 탐사의 효율적인 인력운용을 위하여 탐사장비의 무인화가 더욱 필요하게 되었다. 현재 무인화 된 해양탐사장비는 크게 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)가 있다. ROV의 특징은 해상의 플랫폼과 케이블로 연결되어 전원을 공급받으며 유선으로 조종할 수 있으며 수중 환경에서 작업을 위해 특화된 장비를 탑재하고 있다. 하지만 제한된 운용반경과 숙련된 오퍼레이터가 필요한 단점을 가지고 있다. AUV의 특징은 특정 위치까지 스스로 운항하여 주어진 작업을 수행하고 복귀가 가능하고 조종을 위해 숙련된 오퍼레이터가 필요하지 않으며 운용반경이 ROV보다 넓은 특징을 가지고 있다. 하지만 운용시간이 짧아 대양 혹은 깊은 수심의 관측에는 어려움이 따른다. 이러한 ROV와 AUV의 단점을 극복하고 긴 시간동안 넓은 해역을 관측의 필요성이 커졌다.

무인 수중글라이더의 개념은 미국 우주홀의 해양연구소의 헨리 스톰웰(Henry Stommel) 박사가 1989년 해양학(Oceanography) 학술지에 미래 해양학을 언급하면서 소개 되었으며 작은 중성 부력을 갖는 기계들이 자동으로 관측을 수행하며 또한 부력을 변화 시켜 물속에서 활강하면서 날개를 이용하여 수평방향으로 약 0.5knot의 속력으로 이동할 수 있을 것으로 예상했다[12] 또한 수중을 이동하여 얻은 수중환경 데이터는 위성통신을 이용하여 전송할 수 있을 것으로

예상했다. 이러한 개념을 이용하여 초기에 부력을 조절하여 수심을 조절할 수 있는 뜰개[10]가 개발되어 해류를 따라 표류하며 오랜시간동안 해양을 관측이 가능하였으나 경로파악의 어려움으로 회수가 불가능하며 원하는 위치로 능동적으로 이동할 수 없어 특정지역을 탐사하지 못하는 단점을 가지고 있었다. 이런 단점을 극복하고 AUV의 장점을 살리기 위하여 무인수중글라이더가 개발되었다.

일반적인 수중 글라이더는 긴 시간동안 운항하기 위하여 별도의 추진체가 없으며, 부력과 중력의 차이에 의해 발생하는 힘을 이용하여 추진력을 얻게 된다. 수중 글라이더의 부력을 제어하기위하여 부력제어 장치가 탑재되게 되며 또한 글라이더의 자세를 제어하기 위하여 제어판을 사용하거나 내부의 질량을 이동시켜 자세를 제어하게 된다. 현재 상용으로 사용되는 어뢰형의 수중 글라이더는 ONR(Office of Naval Research)의 지원을 받아 Washington Univ.에서 제작한 Seaglider[2]와 Scripps에서 제작한 Spray[11]와 Woods Hole 해양연구소에서 개발한 Slocum[14] 그리고 ANT에서 제작한 Littoral Glider가 있다. 각각의 무인수중글라이더의 외형은 Fig.1.1~1.4와 같고 특성은 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Specification of commercial Unmanned Underwater Gliders

| | Littoral Glider | Slocum | Seaglider | Spray |
|------------------------|--------------------|----------|------------|------------|
| Speed | 2 kts | 0.75 kts | 0.90 kts | 0.90 kts |
| Payload | 5 kg(6L) | 5 kg | 4 kg | 3.5 kg |
| Buoyancy Engine Volume | 2.5 L | 0.52 L | 0.84 L | 0.91 L |
| Battery Cap. | Li Primary | Alkaline | Li Primary | Li Primary |
| | 27.5 MJ | 8 MJ | 10 MJ | 13 MJ |
| Sat Comms | 30.8 kg | 18 kg | 9.4 kg | 9.4 kg |
| | Globalstar/Iridium | Iridium | Iridium | Iridium |
| Weight | 112 kg | 51 kg | 51 kg | 50 kg |
| Op. Depth | 200m | 200m | 1,000m | 1,500m |
| Mission Duration | 30 days | 20 days | 220 days | 330 days |
| | CTD & Acoustic | CTD only | CTD only | CTD only |



Fig. 1.1 Littoral glider



Fig. 1.2 Slocum glider

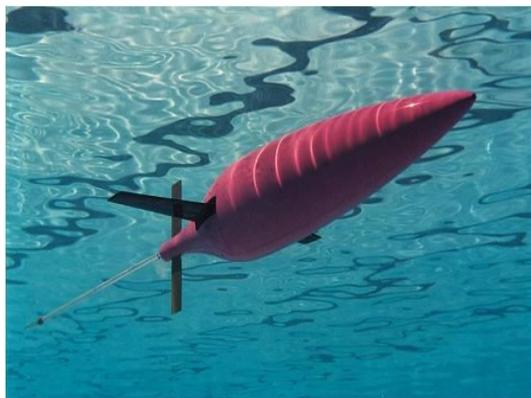


Fig. 1.3 Sea glider



Fig. 1.4 Spray glider

무인 수중 글라이더는 탐사 목적에 맞는 센서를 탑재하여 긴 시간동안 해양을 관측할수 있다. 예를 들어 CTD 센서를 사용하여 순환류의 염도, 수온, 해류, 압력 등을 관측할 수 있으며 음향센서를 사용하여 수중생물을 추적하여 관측할 수 있다. 실제로 부리고래종이 내는 소리를 추적하여 무인 수중 글라이더로 실시간 위치를 파악한 시스템이 이미 개발되어 있다. 이외에 다양한 목적의 해양 관측장비로 활용될 것으로 예상된다.[1][3]

1.2 연구목적

현재 개발된 무인수중 글라이더의 운용개념은 Fig. 1.5와 같다. 초기 모선 또는 수상 플랫폼에서 수중글라이더를 진수를 하고 명령을 내리면 수중글라이더는 상승과 하강운동을 반복하며 수중항법 알고리즘을 이용하여 목표지점까지 이동하고 명령을 수행하게 된다. 명령을 수행하고 관측된 데이터는 수상으로 부상하여 무선통신과 위성통신을 통하여 모선에 전송하게 되며 그후 다른 명령을 수행하거나 모선에 회수되게 된다. 또한 수중 글라이더가 활강을 할때는 Fig. 1.6과 같은 힘이 글라이더에 작용하게 된다. 무인 수중글라이더가 활강을 시작하기전엔 부력과 중력에의한 힘만 작용하나 글라이더가 활강을 시작하게되면 유체에의해 발생하는 양력과 항력이 날개와 선체에 작용하게된다. 부력, 중력, 양력, 항력에 의해 글라이더의 선체방향의 이동속도는 결정되게 되며 이때

부력의 크기변화가 수중글라이더의 이동속도에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구의 연구 목적은 기존에 개발된 글라이더의 운용 최고 속도가 충분히 빠르지 않아 조류 및 외란의 영향을 많이 받게 된다. 이를 극복하기 위하여 부피대비 부력제어량을 늘려 최고속도가 2.5knot 이상의 어뢰형 무인 수중글라이더를 설계 및 제작하고 이를 운용할 수 있는 원천 기술을 확보하는 기초 연구로써 수행되었다.

본 연구에서는 유체의 저항을 최소화 하는 경험식인 Myring Hull Profile Equation을 이용하여 선수부와 선미부의 형상을 설계하고 목표속도에 맞는 부력제어량을 선정하였으며 내부의 자세제어기를 설계하였다. 또한 설계된 무인 수중글라이더의 운동모델링을 수행하여 시뮬레이션을 하였으며 운동시뮬레이션과 실험실 실험을 통하여 글라이더의 운동성능을 해석 하였다.

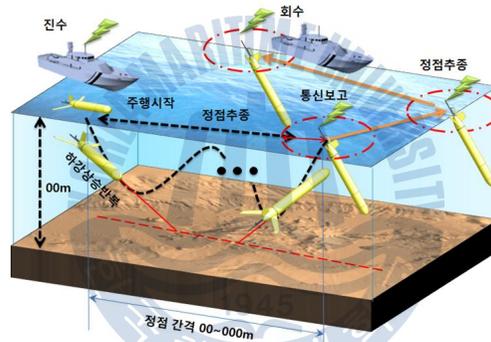


Fig. 1.5 Operation concept of underwater glider

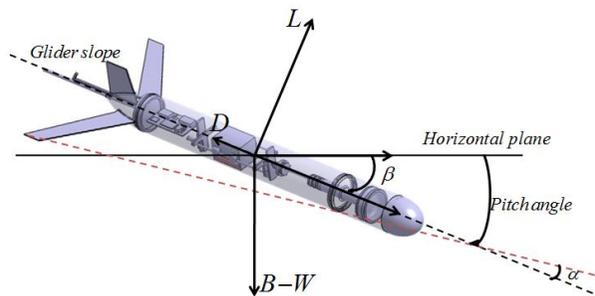


Fig. 1.6 Force acting on the glider

(D=drag, L=lift, B-W=wet buoyancy, β =glider slope angle, α =angle of attack)

제 2 장 수중글라이더 외부 설계

2.1 수중글라이더 외부구성

본 논문에서 설계된 수중글라이더의 외부 구성은 Fig. 2.1과 같다. 초기의 개념 설계 단계에서 수중글라이더의 구성으로써 크게 나누면 선수부의 Nose cone, 부력엔진, 동체, 선미부의 Cowling, Drop weight, 안테나 순으로 구성되어 있다. 또한 Cowling에 한쌍의 수평날개와 하나의 수직날개가 부착되어 있다. Nose cone 부분과 Cowling 부분은 유체가 자유롭게 드나들 수 있는 구조이며 부력엔진 역시 개폐식이 아닌 유체의 유입이 자유로운 구조이다. 후면의 안테나는 RF안테나, GPS안테나, 위성통신용 안테나가 내장되어 있다.



Fig. 2.1 External shape of underwater glider

2.2 수중글라이더 외부설계

본 논문의 글라이더는 어뢰형의 외형을 가지는 수중글라이더로써 글라이더의 속도와 부피제어비의 관계에 의해 크기가 결정되었으며 또한 선수부와 선미부는 유체의 저항을 최소화할 수 있는 형상을 가지도록 설계를 하였다.

본 무인 수중 글라이더를 설계함에 있어서 선수부와 선미부는 유선형으로써 설계조건에 맞게 운항이 용이하도록 유체저항계수를 최소화 할 수 있는 Myring Hull Profile Equation을 적용하였다. 이는 선체가 받는 유체 저항을 최소화 할 수 있는 경험식이며, 아래 Fig. 2.2은 수중 운동체의 외형에 따른 표면에서 유체의 유속 정도를 나타낸다. 이를 바탕으로 본 글라이더의 형상은 선수와 선미부에 유선형이며, 동체부분은 직선으로 이루어진 형상을 선정하여 설계를 진행 하였다.

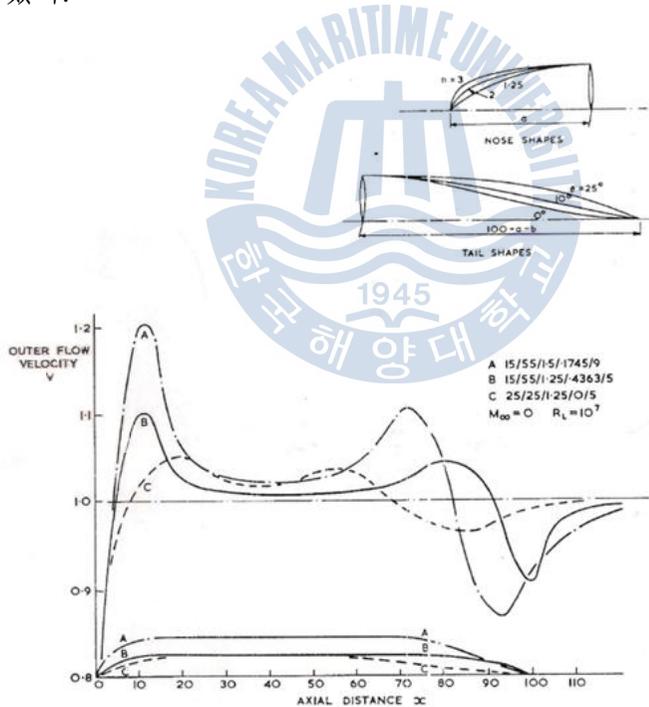


Fig. 2.2 Outer flow velocity distributions[9]

2.2.1 선수부 설계

수중글라이더의 선수부에는 Nose cone이 있으며 이는 유체의 저항을 최소화 하는 경험식인 Myring Hull Profile Equation[9]을 이용하여 설계되었다. 선수부에 적용된 식은 식 2.1과 같다.

$$r(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x + a_{offset} - a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

또한 Myring profile에 필요한 변수들은 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 Parameters of myring profile for Underwater Glider

| parameters | Description |
|--------------|-------------------------|
| a | Nose Length |
| a_{offset} | Nose Offset |
| b | Mid Length |
| c | Tail Length |
| c_{offset} | Tail Offset |
| n | Exponential Coefficient |
| θ | Include Tail Angle |
| d | Max. Hull Diameter |
| l_f | Forward Length |
| l | Total Length |

선수부의 Myring profile을 적용하기 위한 파라미터의 적용은 Fig. 2.3과 같으며, 선체의 단위길이에 대한 높이를 연산하여 설계에 적용하였으며 외형은 Fig. 2. 4(a)(b)와 같다. 설계한 선수부 내부의 경우 불필요한 무게를 제거하기 위해 안쪽을 비웠으며, 다음으로 체결되는 부력제어기의 빈 공간에 해수가 유입되어야 하기 때문에 특별한 방수장치 없이 자유롭게 해수가 유입 가능하도록 설계하였다.

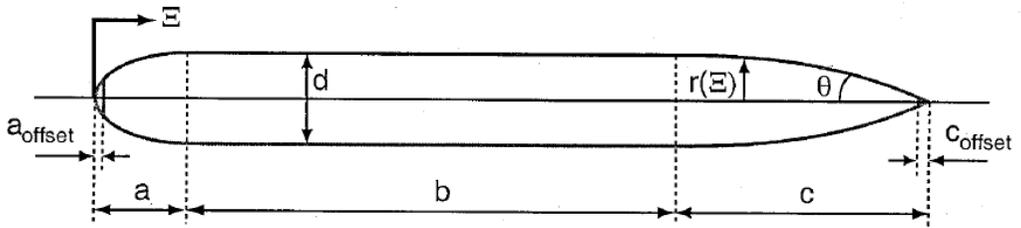
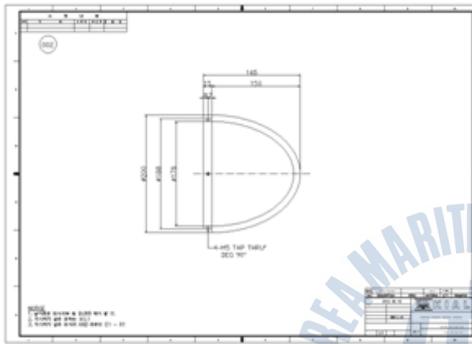


Fig. 2.3 Vehicle hull radius as a function of axial position[9]



(a) 2D Drawing of nose cone



(b) 3D Shape of nose cone

Fig. 2.4 Shape of nose cone

2.2.2 선미부 설계

선미부는 아래 Fig. 2.5와 같이 크게 후면 커버, 카울링, 날개, 견인고리, 안테나 그리고 비상 양성부력 장치로 구성된다.

후면 커버의 경우 동체와 결합되며, 동체내의 수밀을 위해 O-ring홈이 있으며 날개를 제외한 후면부의 모든 부분과 결합된다. 그리고 날개는 후면 커버와 카울링의 사이에 조립식으로 결합된다.

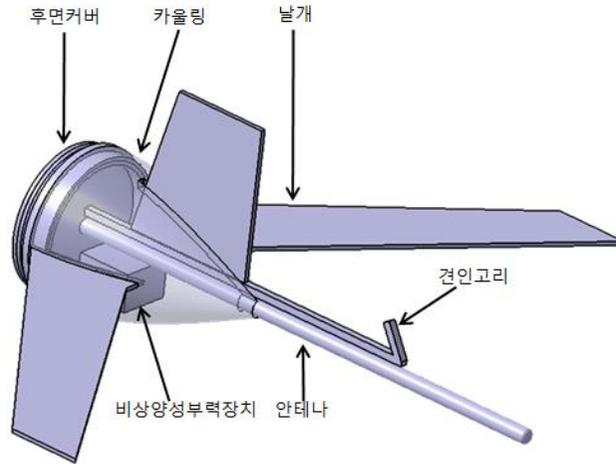
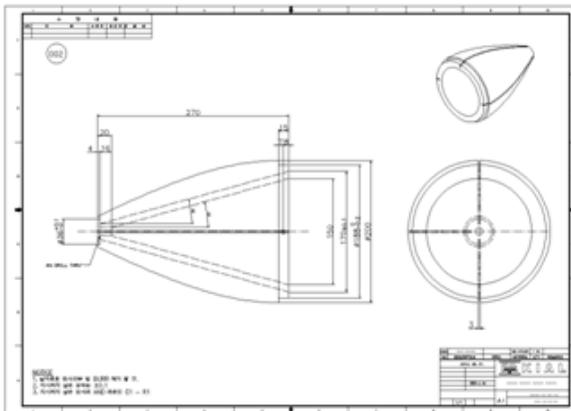


Fig. 2.5 Configuration of stern section

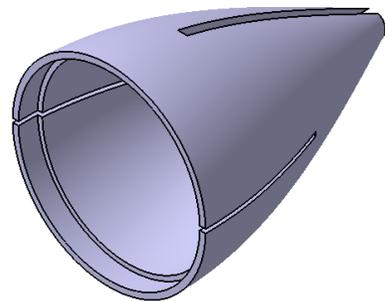
선미부의 cowling에도 선수부와 마찬가지로 유체의 저항을 최소화하여 운항 가능하도록 Myring profile을 적용하였다. 선미부의 적용된 Myring profile의 형상에 대한 식은 식 2.2와 같다.

$$r(x) = \frac{1}{2}d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan\theta}{c} \right] (x-l)^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\tan\theta}{c^2} \right] (x-l_f)^3 \quad (2.2)$$

카울링 설계에 필요한 제원은 Table 2.1과 같으며, 위 식 2.2를 통하여 설계한 선미부의 카울링 형상은 Fig. 2.6와 같다.



(a) 2D Drawing of cowling



(b) 3D Design of cowling

Fig. 2.6 Shape of cowling

2.2.3 동체 설계

본 논문에서 설계된 수중글라이더의 설계 목표인 2.5knot의 수평속도와 목표 최대 운용수심 200m를 만족시키기 위해서는 동체의 설계가 중요하다. 동체의 크기에 의해 부력과 payload가 결정되게 되며 이로 인해 제어가능한 체적대비 부력제어비가 결정되게 된다. Fig. 2.7과 같이 글라이더의 최대속도는 글라이더의 제어 체적에 의해 결정되며 체적대비 부력제어비는 n_b 와 같다.[5]

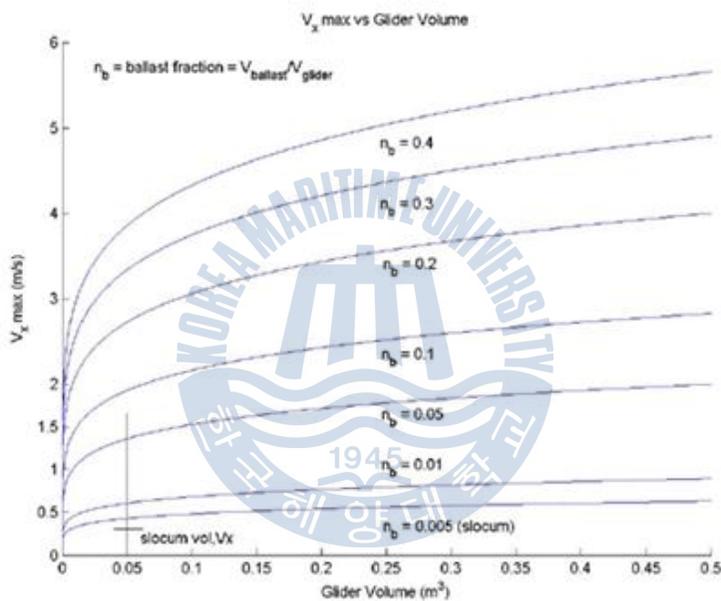


Fig. 2.7 Maximum horizontal velocity vs glider size and ballast fraction

또한 운용최대수심 200m에서의 설계된 수중글라이더의 안정성을 평가하기 위하여 좌굴해석을 수행하였으며, 좌굴해석은 ANSYS ver.12.1을 사용하여 설계된 동체를 해석하였다. 좌굴해석에 사용된 3D 동체 모델링은 Fig. 2.8과 같다. 좌굴해석은 두가지 경우에 대하여 시행하였고 두께를 제외한 형상 및 제원은 서로 같은 조건에서 해석을 실시하였다. 그러므로 두께의 차이에 의한 결과를 확인 하였으며, 동체의 치수는 Table 2.2에 정리하였다.

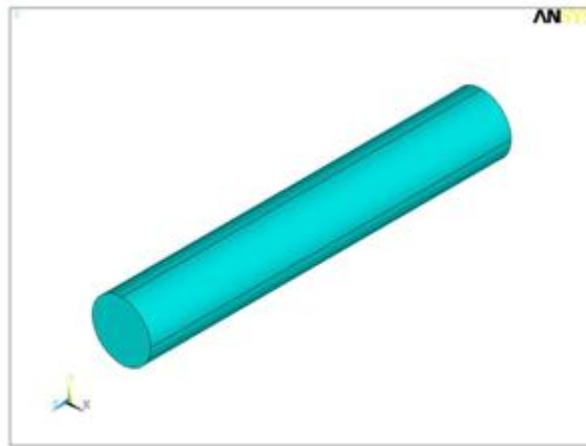


Fig. 2.8 Shape of Hull

Table 2.2 Analysis case

| CASE | Thickness | Length | Diameter |
|--------|-----------|----------|----------|
| Case 1 | t_1 mm | l_h mm | D mm |
| Case 2 | t_2 mm | l_h mm | D mm |

2.2.3.1 좌굴 해석조건 및 경계조건

요소는 Shell181(4-Node structural shell)을 사용하였고, 격자(Mesh)는 균일 사각 격자(Uniform quad method)로 생성하였으며 해석조건은 아래 Table 2.3에 정리하였다.

유한요소해석을 위한 변위 경계조건은 동체와 부력제어기가 결합되는 부분의 모든 병진 및 회전 자유도를 구속하였으며, 외부압력의 경우 모든 방향으로 압력이 고르게 작용하도록 하였다. Fig. 2.9의 붉은 원 부분이 부력엔진과 결합되는 부분으로 위와 같은 조건으로 구속한 부분임을 확인할 수 있다.

Table 2.3 Analysis Conditions

| Property | Value |
|-----------------------|---------------------------|
| Material | Aluminum Alloy 6061-T6 |
| Modulus of Elasticity | 68 GPa (Room Temperature) |
| Poisson's Ratio | 0.3 |
| Element Type | Shell181 |
| External Pressure | 1 Pa (On All Area) |

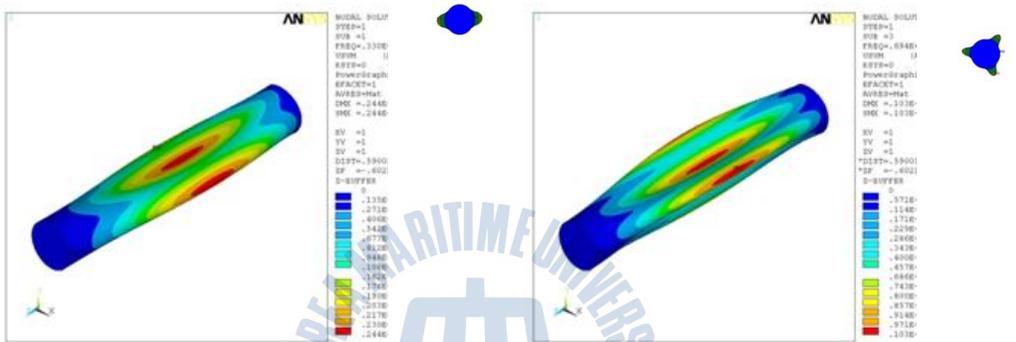


Fig. 2.9 Boundary condition

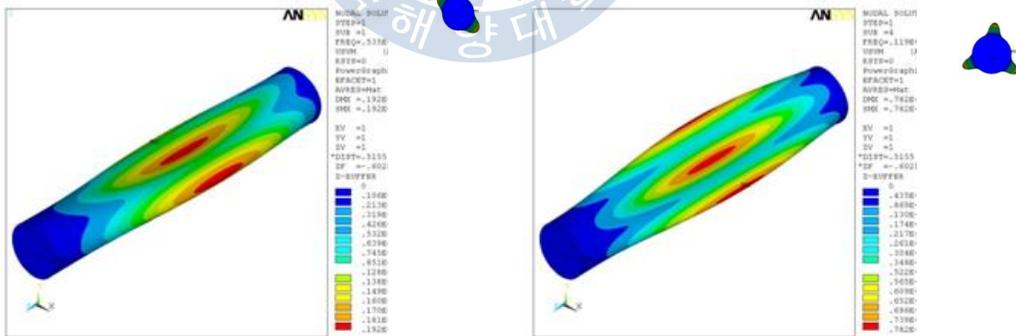
2.2.3.2 동체의 내압 해석

Case 1의 경우 최초 3.30MPa에서 좌굴이 발생하였고, Case 2의 경우 5.35MPa에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

아래의 Fig. 2.10는 좌굴해석 결과로 각 경우의 영구 변형된 형태를 확인할 수 있다. 좌굴로 인한 변형된 형태가 육안으로 확인하기 힘든 정도로 작을 것이기 때문에 비율적으로 확대하여 그 형태를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.



(a) Case 1-1 Buckling Mode Shape (c) Case 1-4 Buckling Mode Shape



(a) Case 2-1 buckling Mode Shape (b) Case 2-4 Buckling Mode Shape

Fig. 2.10 Results of buckling mode shapes

Table 2.4 Results of buckling analysis

| (a) Result of case 1 | | (b) Result of case 2 | |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Case 1 | | Case 2 | |
| Mode Number | Buckling Pressure | Mode Number | Buckling Pressure |
| Case 1-1 | 3.30 MPa | Case 2-1 | 5.35 MPa |
| Case 1-2 | 6.94 MPa | Case 2-2 | 11.93 MPa |
| Case 1-3 | 7.65 MPa | Case 2-3 | 12.11 MPa |
| Case 1-4 | 8.83 MPa | Case 2-4 | 12.09 MPa |

이번 해석을 통하여 동체가 수중에서 압력을 받을 때 두께에 따른 좌굴하중을 해석하였다. 각각의 경우에 따른 좌굴하중을 Table 2.4 에 나타내었다.

이번 해석을 통하여 동체 설계에 있어 Case 1, 2 모두 목표 수심에서 안전함을 알 수 있었으나 안전율을 고려한다면 Case 2의 결과가 동체설계에 더욱 적합함을 알 수 있다.



제 3 장 수중글라이더 내부 설계

3.1 수중글라이더 내부구성

설계된 수중글라이더의 내부구성은 Fig. 3.1과 같다. 내부 구성품 으로는 부력 엔진, 자세제어기, 리튬폴리머 배터리, 위치와 방위를 측정하는 센서와 내부 침수여부를 알 수 있는 기압센서와 센서데이터를 수집하는 센서데이터수집 보드, 수중글라이더를 제어할 위한 제어보드, 외부와 통신을 위한 통신 보드가 위치하게 된다.

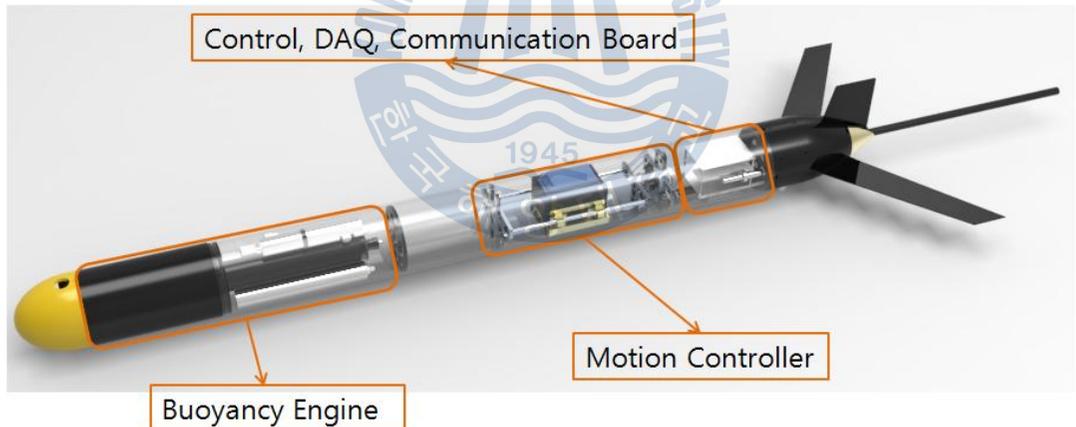


Fig. 3.1 Inside composition of underwater glider

수중글라이더의 내부는 펌프를 이용하여 내부 공기를 배출시켜 압력이 일반적인 대기압보다 낮게 되며 이는 전면부의 외부에 노출되는 부력제어기와 후면부의 엔드캡을 동체에 체결함과 동시에 기압의 변화에 의해 내부가 침수되었는지 판단할 수 있도록 하기 위함이다.

3.1.1 부력엔진 설계

본 논문에 사용된 부력엔진은 (주)한국도키텍에서 제작되었으며 앞서 설명한 체적대비 부력제어량을 제어할 수 있도록 설계되었다. 부력엔진은 유압식으로 작동하게 되며 구성은 부력엔진 하우징, 피스톤과 피스톤실린더, 전동모터와 유압펌프, 체크밸브, 솔레노이드 밸브, 유압오일탱크로 구성되며 외형은 Fig. 3.2 와 같다. 또한 원하는 위치로의 피스톤을 제어하기 위하여 피스톤의 위치를 확인할 수 있는 리니어스케일이 장착되어 있다. 부력엔진 하우징과 동체간에는 O-ring을 이용한 수밀 방식을 선택하여 방수가 되도록 설계하였으며, 피스톤 로드 주변의 여유공간에 일탱크 및 유압모터 등을 구성하여 공간을 활용할 수 있도록 하였다.

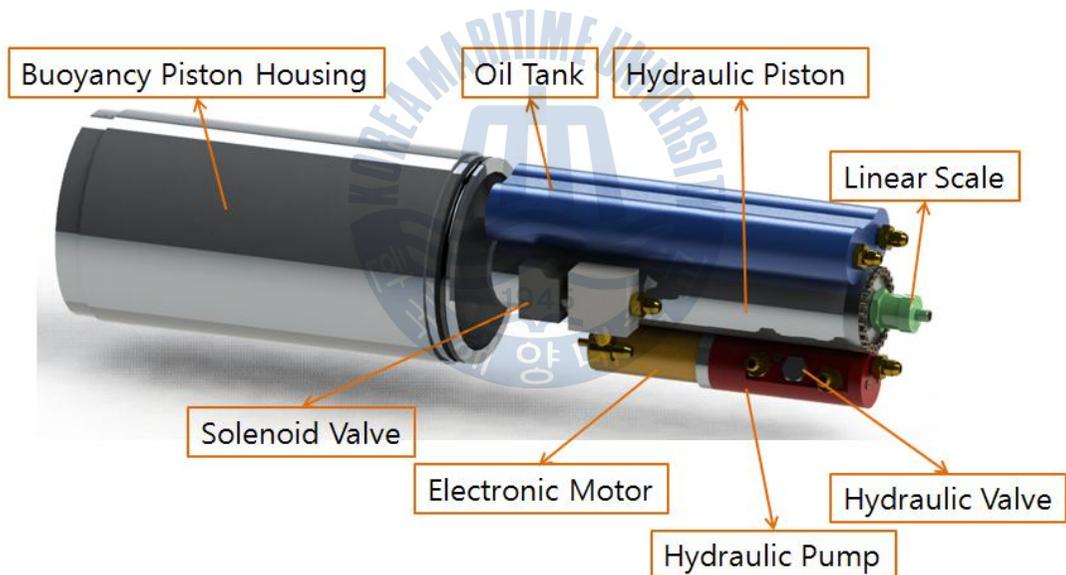


Fig. 3.2 Configuration of buoyancy engine

또한 부력엔진의 유압 회로도도 Fig. 3.3과 같으며 리니어 스케일의 위치신호에 따라 제어보드에서 나온 신호를 통하여 부력엔진의 모터를 작동하거나 솔레노이드 밸브를 개폐시켜 피스톤을 원하는 위치까지 이동시킬 수 있게된다.

본 논문에서 설계된 부력제어기는 피스톤이 체적을 증가 시킬때만 전동 모터

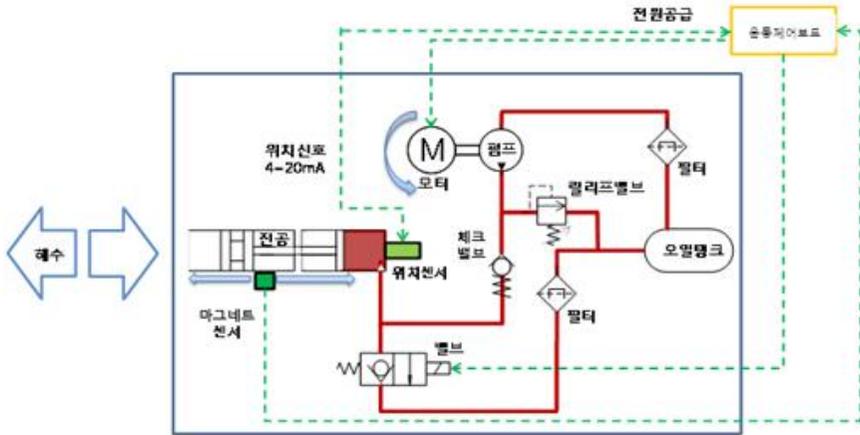


Fig. 3.3 Hydraulic circuit of buoyancy engine

를 사용하며 피톤이 체적을 감소 시킬때는 솔레노이드 밸브를 개폐시켜 외부의 압력과 부력엔진하우징의 진공압에의해 피스톤이 후진하게 된다. 피스톤의 후진시 전동 모터를 사용하지않아 에너지의 소모를 최소화 할 수 있도록 설계 하였다.

3.1.1.1 유압 펌프

수중글라이더의 특성상 작은공간에 적용할 수 있는 저유량 고압펌프는 Radial piston 방식의 펌프가 적당하다. 기초설계 단계에서 계산된 토출유량과 사용압력을 고려한 모터의 선정으로 펌프의 사양은 토출유량을 모터의 정격회전수로 나누어주면 약 0.118cc/rev가 되며 펌프의 효율을 고려하여 0.12cc/rev의 유량의 펌프로 제작하였다. 피스톤펌의 내부 구조는 Fig. 3.4와 같다.

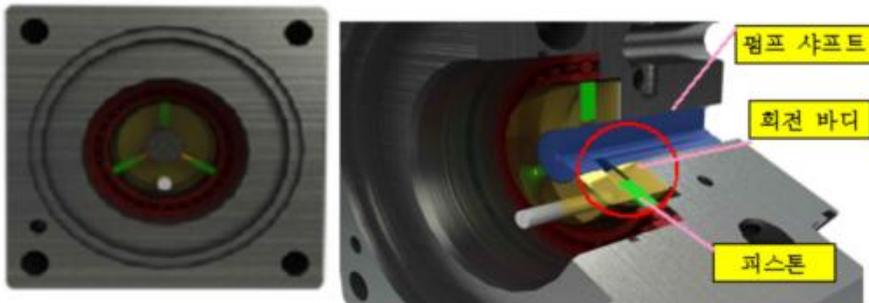


Fig. 3.4 constitution of piston pump

펌프의 작동원리는 Fig. 3.5와 같이 적색원형선이 베어링내륜, 청색원형선이 로테이터, 녹색 원형이 스테이터라고 하면 스테이터에는 양쪽으로 슬롯이 형성되어 흡입과 토출의 역할을 하는 통로가 형성된다. 베어링 내륜과 로테이터의 중심점은 1.4mm off-set이 되어 있다. 12시 방향을 기준으로 로테이터 시계방향으로 회전한다며 피스톤은 원심력에 의해 좌측 흡입구로부터 기름을 흡입하여 12시를 정점으로 피스톤은 베어링 내륜에 의해 다시 수축이 되며 우측 토출라인에 기름을 공급한다. 이런 방식으로 피스톤 동작으로 유량을 토출하도록 설계되었다. 설계된 유압펌프의 내부의 실제 외형은 Fig. 3.6과 같다.

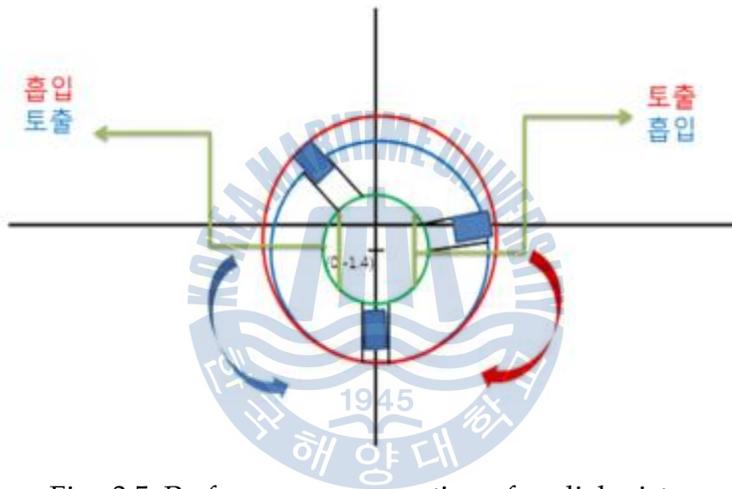


Fig. 3.5 Performance properties of radial piston



Fig. 3.6 Inner configuration of hydraulic pump

3.1.1.2 부력엔진 피스톤

부력엔진 피스톤은 부력엔진 하우징과 실린더로 구성되어지며 실린더는 해수와 접촉하는 부력 피스톤과 오일과 접촉하는 유압피스톤으로 구성되어지고 이들은 하나로 가공되어 하우징에 장착된다. 부력피스톤과 하우징 내부의 벽면은 진공으로 부력피스톤이 후진시에는 복원력이 작용하여 스프링을 대신하는 역할을 수행한다. 부력엔진 피스톤의 단면은 Fig. 3.7과 같다. 위와 같은 설계를 통한 부력엔진의 실제 형상은 Fig. 3.8과 같다.

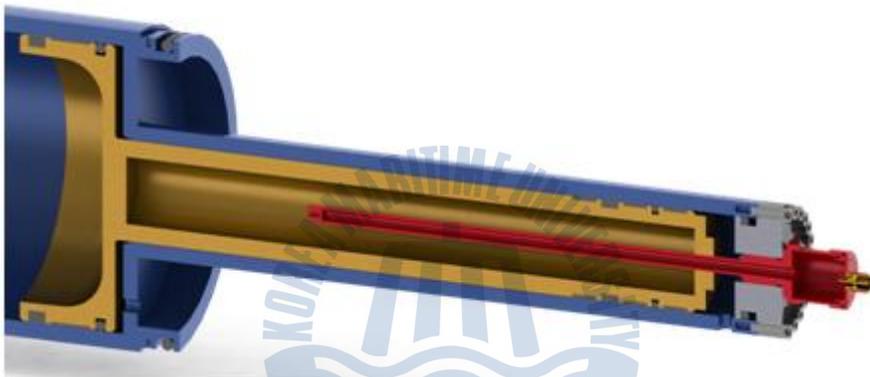


Fig. 3.7 Cross-section of buoyancy engine piston



Fig. 3.8 Buoyancy engine

3.1.2 자세제어기 설계

일반적인 무인 잠수정은 방향타와 핀 혹은 추진기를 이용하여 원하는 자세로 제어 될 수 있도록 개발되어 있다. 일반적인 잠수정은 외부의 방향타에 의해 방향각을 제어하여 원하는 방향으로 선회 및 회전을 할 수 있으며 또한 추진기를 이용하여 방향을 제어할 수 있게 된다. 본 논문에서 설계한 수중글라이더는 방향각과 자세를 제어하기 위하여 별도의 추진기나 방향타등을 사용하지 않고 내부의 질량체를 이동시켜 방향각 및 자세를 제어할 수 있도록 설계를 하였다. 내부의 자세제어기는 한국해양대에서 제작을 하였으며 자세제어기의 외형은 Fig. 3.9과 같다. 자세제어기의 구성은 두 개의 전동모터와 내부의 질량체, 볼스크류, 볼스크류 가이드, 크로스 롤러 링, 추가 질량체, 풀리로 구성되어 있다. 질량체는 내부 구성품중 가장 큰 질량을 가지는 배터리팩을 사용하였다.

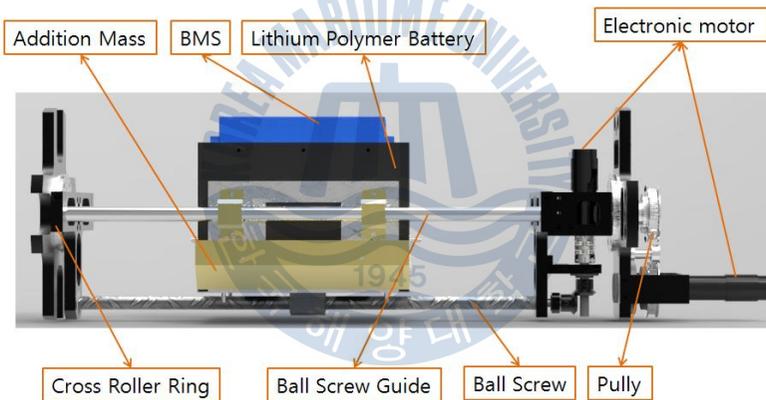


Fig. 3.9 Configuration of motion controller

자세제어기는 전동모터를 이용하여 볼 스크류를 회전시켜 내부 질량체가 전진 및 후진이 가능하도록 설계 하였으며 또한 양 끝단의 크로스 롤러링을 전동모터로 회전시켜 좌우로 회전이 가능하도록 설계를 하였다.

자세제어기의 내부 이동질량이 전진 및 후진 운동을하면서 수중글라이더의 pitch 운동을 제어하게 되며 또한 좌우 회전운동을 하여 수중글라이더의 roll 운동을 제어하게 된다. 각각의 운동을 할수 있는 자세제어기의 구조는 Fig. 3.10와 같다.

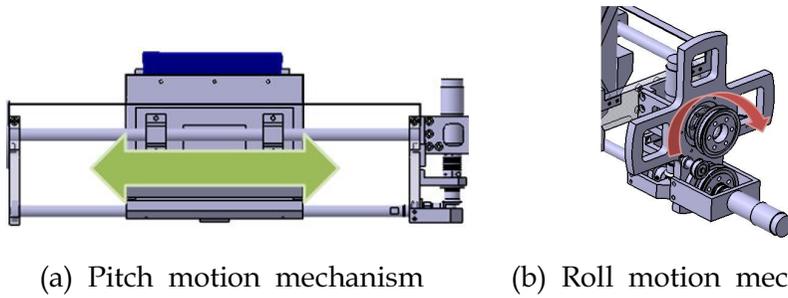


Fig. 3.10 Motion controller mechanism

또한 자세제어기의 모터를 선정함에 있어 토크와 추력간의 관계식을 사용하였으며 식은 다음과 같다.

$$T = \frac{F_b \cdot Ph}{2\pi \cdot \eta_1} \quad (3.1)$$

식 3.1에 사용된 변수 들은 Table 3.1에 정리하였다. 또한 안전율과 모터의 구동효율 및 감속기의 효율을 연산하여 모터를 선정하였다. 위와 같은 설계를 통한 자세제어기의 실제 형상은 Fig. 3.11과 같다.

Table 3.1 Parameters of motor

| Variables | description |
|-----------|---|
| F_a | Generate force |
| F_b | Frictional resistance of guide surface ($\mu \times m_m \cdot g$) |
| μ | Frictional resistance |
| m_m | Mass of movable mass |
| g | Acceleration of gravity ($9.8m/s^2$) |
| T | Driving torque |
| Ph | Read of screw |
| η_1 | Efficiency of screw |



Fig. 3.11 Motion controller

3.1.3 전장부 구성

전장부에 구성된 보드는 크게 자율제어 보드, 자세제어 보드, 전원분배 보드, 통신 보드로 나누어 지게 되며 전장부의 위치는 엔드캡에 부착되어 지게 된다. 전체 전장부의 다이어그램은 Fig. 3.12과 같다. 각종 센서 데이터를 자율제어 보드를 통해 데이터를 수집하고 이를 바탕으로 제어 신호를 자세제어보드로 전송하게 되고 후에 자세제어보드에서 각각의 모터 드라이버를 통하여 부력엔진 및 자세제어기를 제어하게 된다. 자율제어 보드는 ARM 계열의 Beagleboard-XM ARM cortex-A8을 사용하였고 OS는 Linux 계열을 사용 하였다. 자세제어 보드의 다이어그램은 Fig. 3.13과 같으며 Atmega 128을 사용하여 자율제어 보드와 통신하여 모터 드라이브의 구동과 부력엔진, 자세제어기의 위치센서값을 받는 역할을 한다. 전원분배 보드는 주 전원에서 나온 전원을 각각의 구성품에 맞는 전압으로 변환하여 분배해주는 보드로 다이어그램은 Fig. 3.14과 같다.

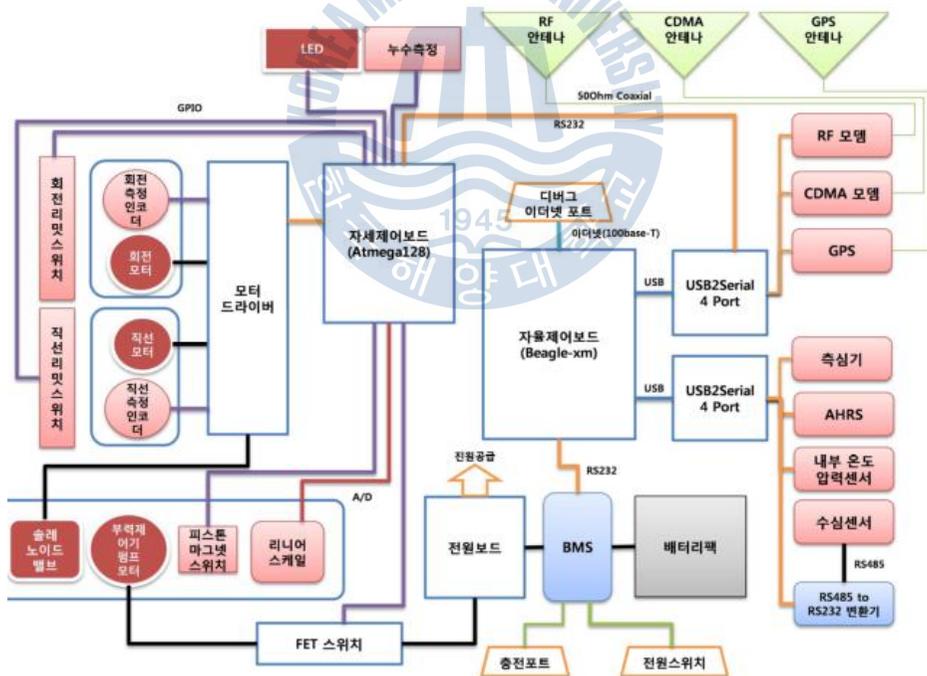


Fig. 3.12 Diagram of control system

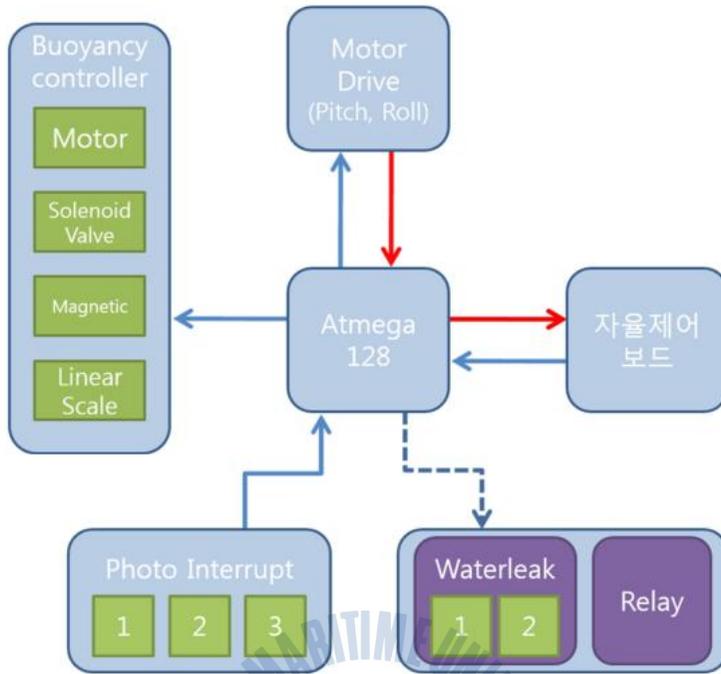


Fig. 3.13 Diagram of motion control board

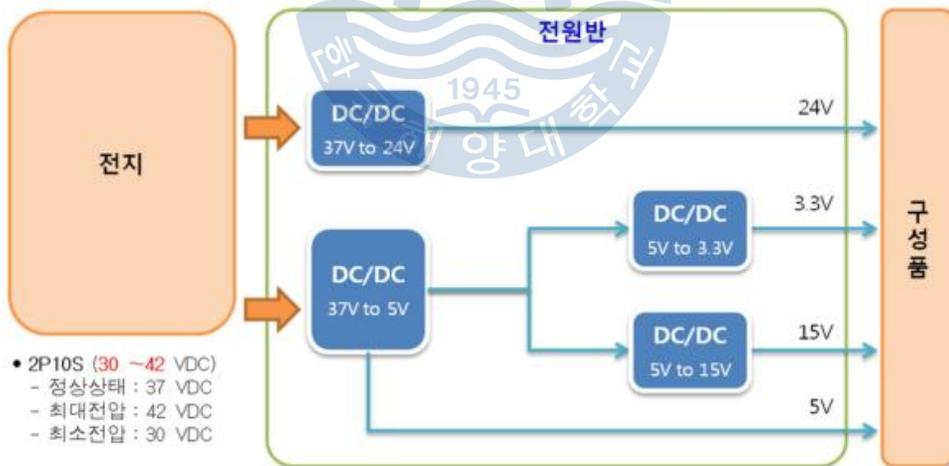


Fig. 3.14 Diagram of power distribution board

제 4 장 수중글라이더 운동 모델링

설계된 수중글라이더의 운동성능을 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 수중글라이더의 운동 모델링을 수행하였다. 일반적인 수중 운동체의 운동 모델링은 각축의 운동방정식과 유체에 의해 발생하는 유체력을 이용한 모델링을 수행하게 되고 본 논문에서는 무인 수중글라이더의 비선형 6자유도 운동방정식을 유도하고 유체력미계수를 실험을 통하여 추정하였다.

4.1 좌표계의 설정

일반적인 강체의 6자유도 비선형 운동방정식을 유도하기 전 좌표계를 설정하여야 한다. 좌표계는 지구 고정좌표계와 강체고정좌표계 두 가지의 좌표계를 설정하였으며 선정된 좌표계는 Fig. 4.1과 같다. 지구 고정좌표계 $EX_EY_EZ_E$ 는 NED 좌표계를 사용하였다. 또한 강체 고정좌표계 $Ox_0y_0z_0$ 의 원점 강체의 임의의 점에 두었다. 좌표계 및 운동방정식에 쓰여진 변수는 Table 4.1에 정리하였다.[4]

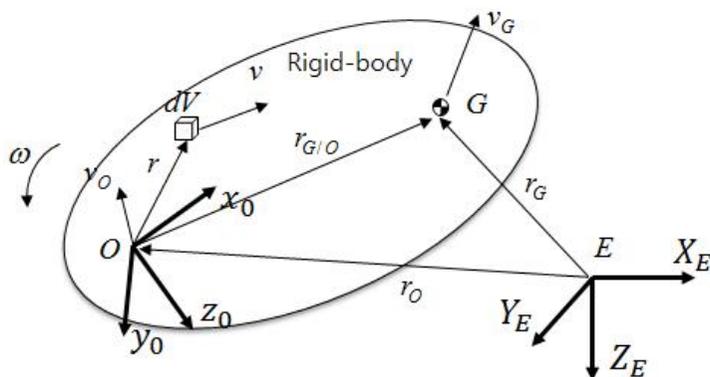


Fig. 4.1 The inertial earth-fixed frame and body-fixed frame

Table 4.1 Variable for dynamics modeling

| variables | description |
|-----------------------|---|
| \mathbf{v}_0 | $[u, v, w]^T$, translational velocity vector in the body-fixed frame |
| $\boldsymbol{\omega}$ | $[p, q, r]^T$, angular velocity vector in the body-fixed frame |
| \mathbf{F}_G | $[X, Y, Z]^T$, external forces |
| \mathbf{M}_G | $[K, M, N]^T$, moment of external forces about O |
| I_0 | inertia tensor in the body-fixed frame |
| m_t | total mass of the glider |
| r_m | position vector to movable mass in the body-fixed frame |
| r_h | position vector to center of hull |
| r_s | position vector of static block |
| r_{cb} | position vector from origin of the body-fixed frame to CB |
| r_{cg} | position vector from origin of the body-fixed frame to CG |
| V_{var} | variable volume due to buoyancy device |
| V_{fix} | fixed volume of the glider |
| ϕ_m | rotational angle of movable mass |
| x_p | variable length of buoyancy piston |
| x_m | variable length of movable mass |

4.2 강체의 6자유도 비선형 운동방정식

수중글라이더의 운동방정식을 유도하기전 일반적인 강체의 6자유도 비선형 운동방정식을 유도하였다. 일반적인 강체의 운동을 나타낸 Fig. 4.1을 이용하여 강체의 병진운동을 표현하기 위해 지구고정좌표계의 원점 E 에서 강체의 질량중심 G 까지의 위치벡터 r_G 는 식 4.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_G = r_O + r_{G/O} \quad (4.1)$$

위 식을 지구 고정좌표계에 대한 미분을 하면 식 4.2와 같다.

$$v_G = \dot{r}_G = \dot{r}_O + \dot{r}_{G/O} \quad (4.2)$$

위식을 한번더 지구 고정좌표계에 대한 미분을 하면 식 4.3과 같다.

$$\dot{v}_G = \dot{v}_O + \dot{\omega} \times r_{G/O} + \omega \times \dot{r}_{G/O}$$

또한 지구 고정좌표계에 대한 미분과 강체 고정좌표계에 대한 미분은 식 4.4과 같은 관계를 가진다.

$$\dot{c} = \dot{c} + \omega \times c \quad (4.4)$$

식 4.3을 이용하여 지구 고정 좌표계에 대한 미분을 선체 고정좌표계에 대한 미분으로 고치면 식 4.5와 같다.

$$\dot{v}_G = \dot{v}'_O + \omega \times v_O + \dot{\omega} \times r_{G/O} + \omega \times (\omega \times r_{G/O}) \quad (4.5)$$

식 4.5를 이용하여 강체의 병진 운동방정식을 표현 하면 식 4.6과 같다.

$$m_t (\dot{v}'_O + \omega \times v_O + \dot{\omega} \times r_{G/O} + \omega \times (\omega \times r_{G/O})) = F_G \quad (4.6)$$

위식은 일반적인 강체의 병진운동을 나타내는 운동방정식으로 강체의 질량중심의 병진운동을 선체고정좌표계의 변수로 나타낸다.

또한 회전운동을 나타내기 위해 선체 고정좌표계에 대한 각운동량을 정의하면 식 4.7과 같다.

$$h_O = \int_V r \times v \rho_A dV \quad (4.7)$$

각운동량의 지구 고정좌표계에 대한 미분은 식 4.8과 같다.

$$\dot{h}_O = \int_V r \times \dot{v} \rho_A dV + \int_V \dot{r} \times v \rho_A dV \quad (4.8)$$

식 4.8의 우항의 첫 번째 항은 모멘트 벡터 m_O 가 된다 또한 v 는

$$v = \dot{r}_O + \dot{r} \quad (4.9)$$

이므로 식 4.8을 정리하면

$$\dot{h}_O = m_O - v_O \times \int_V (v_O + \dot{r}) \rho_A dV = m_O - v_O \times \int_V \dot{r} \rho_A dV \quad (4.10)$$

와 같다. 또한 선체고정좌표계에서 좌표계 원점 O 에서 질량중심까지의 위치 벡터 $r_{G/O}$ 는 식 4.11과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{G/O} = \frac{1}{m} \int_V r \rho_A dV \quad (4.11)$$

식 4.11의 좌항을 선체고정좌표계의 미분으로 나타내면 식 4.12와 같다.

$$\int_V \dot{r} \rho_A dV = m(w \times r_G) \quad (4.12)$$

식 4.12를 이용하여 식 4.10를 정리하면 식 4.13과 같다.

$$\dot{h}_O = m_O - m v_O \times (w \times r_{G/O}) \quad (4.13)$$

또한 각운동량 h_O 는 식 4.14 와 같이 표현할 수 있다.

$$h_O = \int_V r \times v_O \rho_A dV + \int_V r \times (w \times r) \rho_A dV \quad (4.14)$$

우항의 첫 번째 항은 다음과 같이 식 4.15로 나타낼 수 있다.

$$\int_V r \times v_O \rho_A dV = \left(\int_V r \rho_A dV \right) \times v_O = m r_{G/O} \times v_O \quad (4.15)$$

또한 우항의 두 번째항은 다음과 같이 식 4.16으로 나타낼 수 있다.

$$I_O w = \int_V r \times (w \times r) \rho_A dV \quad (4.16)$$

식 4.15와 식 4.16을 이용하여 식 4.14를 표현 하면 다음과 같다.

$$h_O = I_O w + m r_{G/O} \times v_O \quad (4.17)$$

식 4.17을 선체고정좌표계에 대한 미분으로 나타내면 식 4.18과 같다.

$$\dot{h}_O = I_O \dot{w} + w \times (I_O w) + m(w \times r_{G/O}) \times v_O + m r_{G/O} \times (\dot{v}_O + w \times v_O) \quad (4.18)$$

식 4.13을 식 4.18에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_O \dot{w} + w \times (I_O w) + m r_{G/O} \times (\dot{v}_O + w \times v_O) = \mathbf{m}_O \quad (4.19)$$

식 4.19는 강체의 회전운동을 나타내며 강체의 질량관성 모멘트와 선체고정좌표계의 변수로 표현된다.

위의 식 4.6과 식 4.19를 각축에 대하여 표현하면 식 4.20의 좌항과 같은 강체의 6자유도 비선형 운동방정식이 유도 되며 우항은 유체력항이 된다.

$$\begin{aligned} m_t [\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\ m_t [\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] &= Y \\ m_t [\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p})] &= Z \\ \\ I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{zx}(pq + \dot{r}) \\ &+ m_t [y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \\ I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr - I_{zx}(r^2 - p^2) + I_{yz}(pq - \dot{r}) - I_{xy}(qr + \dot{p}) \\ &+ m_t [z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \\ I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{zx}(qr - \dot{p}) - I_{yz}(pr + \dot{q}) \\ &+ m_t [x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{w} - uq + vp)] = N \end{aligned} \quad (4.20)$$

4.3 수중글라이더의 6자유도 비선형 운동 모델링

일반적인 강체의 운동방정식을 이용하여 수중글라이더의 6자유도 비선형 운동 모델링을 하기 위해서는 추가적인 고려사항이 필요하다. 추가적인 고려사항은 강체와는 달리 수중글라이더는 부력엔진과 자세 제어기에 의해 부력, 부력중심, 질량중심, 질량관성모멘트가 변화하게 된다. 이를 모델링에 반영하기 위해서는 실시간으로 변화하는 변수들에 대한 고려가 필요하다. 그리고 수중글라이더의 피스톤 하우징이 유체가 자유롭게 유입될 수 있는 개방형으로 해수가 피스톤 하우징으로 들어올 때 질량의 변화는 발생하지 않는다. 위의 고려사항을 고려하여 수중글라이더의 운동방정식을 유도하기 위하여 좌표계를 설정하였고 수중글라이더에 사용된 좌표계는 Fig. 4.2와 같으며 지구 고정좌표계 $EX_EY_EZ_E$ 는 NED 좌표계를 사용하였고 선체 고정좌표계 $Ox_oy_oz_o$ 의 원점은 선체의 기하학적 중심에 원점을 두고 선체의 선수 방향과 진행방향을 x_o 축으로 하고 수심방향으로 z_o 축으로 하였으며 y_o 축은 오른손좌표계를 사용하여 결정하였다.[8]

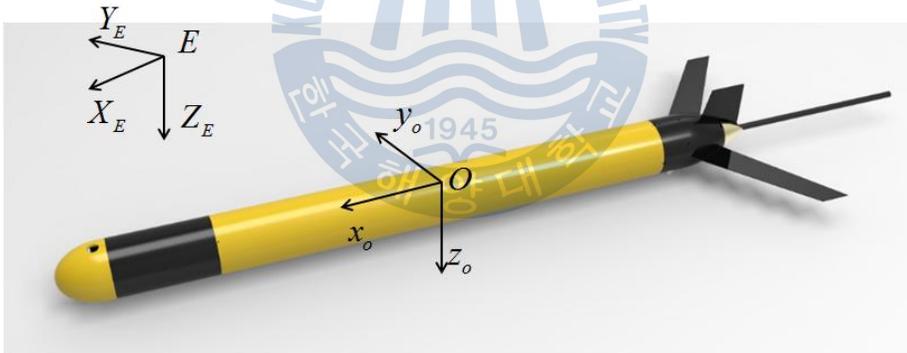


Fig. 4.2 Underwater glider coordinate system

4.3.1 부력 및 부력중심의 변화

부력과 부력중심의 변화는 부력엔진의 피스톤의 이동에 따라 체적이 변화함으로써 발생하게 되며 이를 운동 모델링에 반영하기 위하여 Fig. 4.3와 같이 체적의 변화를 나타 내었다.

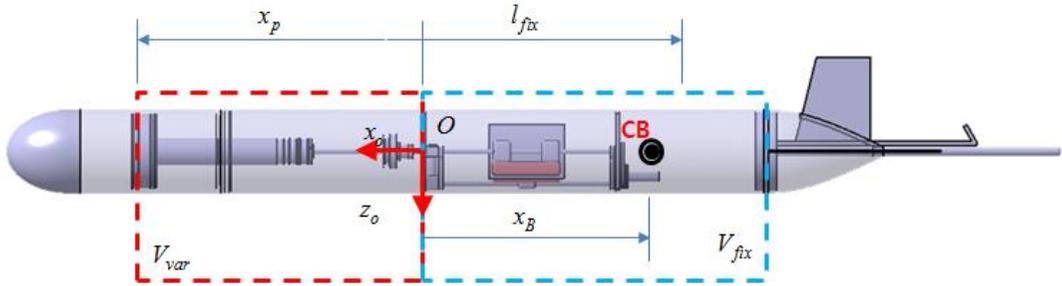


Fig. 4.3 The change of volume according to the location of buoyancy engine piston

선체 고정좌표계의 원점 O 에서 선미 방향의 엔드캡까지의 체적을 고정 체적 V_{fix} 로 두고 선체 고정좌표계의 원점 O 에서 피스톤까지의 체적을 변화하는 체적 V_{var} 로 하여 체적의 변화를 고려 하였다. 체적에 의해 변화하는 부력은 다음과 같이 식 4.21로 나타낼 수 있다.

$$B = \rho(V_{var} + V_{fix})g \quad (4.21)$$

위 식에서 ρ 는 해수의 밀도이며 g 는 중력가속도 이다.

변화하는 체적에 의해 변하는 부력중심의 위치 변화를 고려하기위하여 선체 고정좌표계의 원점에서 부력중심의 위치까지의 x_O 방향의 위치벡터 x_B 를 고려하였고 식 4.22와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{r}_{cb} = [x_B, 0, 0]^T = \begin{bmatrix} \frac{V_{var} \frac{x_p}{2} + V_{fix} l_{fix}}{V_{var} + V_{fix}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

이때 동체의 형상이 실린더 형으로 상하 및 좌우대칭 임으로 부력중심의 위치는 y_O 와 z_O 축의 방향으로는 이동이 발생하지 않는다.

또한 실시간으로 이동하는 피스톤의 이동속도를 고려하여 체적변화에 적용하기 위하여 다음과 같은 피스톤이동 속도에 대한 모델링을 하였으며 피스톤이 전진과 후진시 이동 메커니즘이 달라 각각 모델링을 수행하였다.

피스톤이 전진하여 체적을 증가 시킬때는 피스톤의 이동속도는 유압펌프의 유량과 피스톤의 면적에 의해 결정되게 되며 피스톤 이동속도를 모델링 하기 위하여 식 4.23을 이용하였고 다음과 같다.

$$q = A \cdot v_f \quad (4.23)$$

식 4.23의 q 는 유압펌프의 유량 A 는 유압유와 피스톤이 접촉하는 면적, v_f 는 전진시 피스톤의 이동속도이다. 또한 피스톤과 피스톤하우징에 의한 마찰은 무시하였다.

피스톤의 이동속도가 결정되는 것은 유압펌프에서 토출되는 유량에 의해 결정이 된다. 유압펌프에서 토출되는 유량은 다음과 같은 식으로 4.24로 나타낼수 있다.

$$q = D \cdot \omega - K_{Leak} \cdot P \quad (4.24)$$

식 4.24의 D 는 radial pump가 1회 회전 하였을시 토출되는 토출량, ω 는 전동 모터의 각속도, K_{Leak} 은 누출 유량계수, P 는 유압펌프의 토출압력이다.

유압펌프의 압력 P 는 식 4.25와 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{\mu}{K_{HP}} q_{Leak} \quad (4.25)$$

이때 μ 는 유압유의 동점성 q_{Leak} 은 누출유량, K_{HP} 는 Hagen Poiseuille 계수이다.

또한 K_{Leak} 은 식 4.26과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{Leak} = K_{HP} / \mu \quad (4.26)$$

식 4.24를 식 2.45와 식 2.26을 이용하여 정리하면 식 2.27과 같다.

$$q = D \cdot \omega - q_{Leak} \quad (4.27)$$

q_{Leak} 은 다음과 같은 식 2.28으로 결정된다.

$$q_{Leak} = D \cdot \omega - D \cdot \omega_{nom} (1 - \eta_V) \quad (4.28)$$

식 4.28의 ω_{nom} 은 전동모터의 공칭 각속도, η_V 유압펌프의 용적효율이다. 식 4.27에 식 4.28을 대입하여 정리하면 식 4.29와 같다.

$$q = D \cdot \omega - D \cdot \omega_{nom} (1 - \eta_V) \quad (4.29)$$

식 4.29에 의해 전동 모터의 각속도에 의해 변화하는 유량을 이용한 피스톤의 전진시 이동속도가 결정되게 되며 식으로 나타내면 식 4.30과 같다.

$$v_f = \frac{D \cdot \omega - D \cdot \omega_{nom} (1 - \eta_V)}{A} \quad (4.30)$$

피스톤이 후진시에는 외부 압력과 피스톤하우징 내부의 진공에 의해 피스톤이 후진하게 되며 이는 설계된 부력엔진의 피스톤하우징에 압력을 가하여 각각의 압력에 따른 후진속도를 측정하였으며, 이는 수심에 따른 압력변화와 같으므로 실험데이터를 이용하여 4차 식으로 근사화 하여 후진시 피스톤의 이동속도를 구하였다. 근사화한 식은 식 4.31과 같다.

$$v_b = a_1 \cdot z^4 + a_2 \cdot z^3 + a_3 \cdot z^2 + a_4 \cdot z + a_5 \quad (4.31)$$

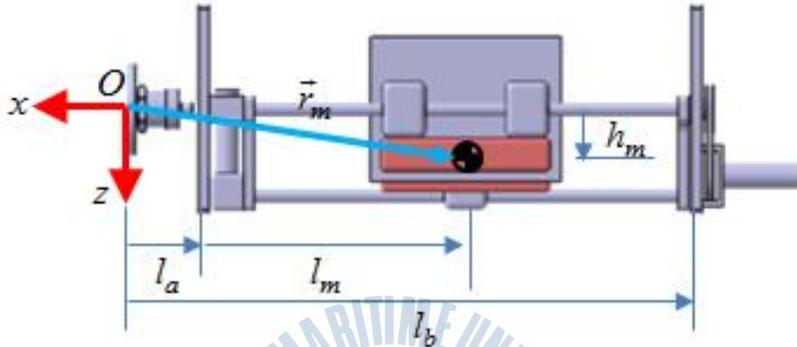
계수 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 는 Table 4.2에 정리하였다.

Table 4.2 Coefficient value of buoyancy piston velocity

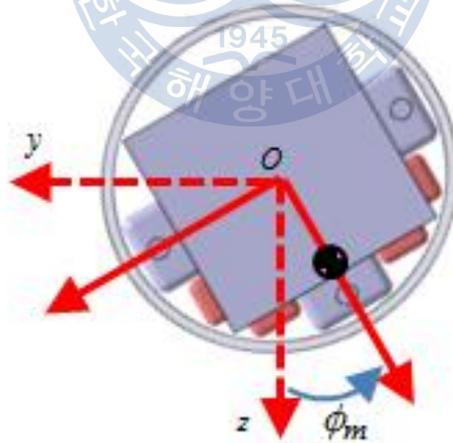
| coefficient | value |
|-------------|-------------|
| a_1 | 1.073e-007 |
| a_2 | -7.127e-005 |
| a_3 | 0.01677 |
| a_4 | -1.718 |
| a_5 | 127 |

4.3.2 질량중심 및 질량관성모멘트의 변화

수중글라이더의 내부에 자세제어기의 전후 운동과 회전운동에 의해 내부질량체인 배터리가 이동되게 되며 이로 인해 질량중심의 위치와 질량관성모멘트의 변화가 발생한다. 이를 고려하기 위하여 Fig. 4.4와 같이 자세제어기를 나타내었다.



(a) Translational motion of motion controller



(b) Rotational motion of motion controller

Fig. 4.4 The change of center of gravity and mass moment of inertia according to the location of inner moving mass

자세제어기의 내부 이동질량체가 전후 및 회전운동시를 고려하면 Fig. 4.4의 와 같이 내부 이동질량체의 질량중심의 위치가 변화하게 되며, 이를 선체고정 좌표계의 원점 O 에서 이동질량체의 질량중심까지의 위치 벡터 r_m 으로 나타내면 식 4.32와 같다.

$$r_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a + l_m \\ -h \cdot \sin\phi_m \\ h_m \cdot \cos\phi_m \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

식 4.32에서 l_m 과 ϕ_m 에 의해서 질량중심의 위치가 변화하게 되며 위치벡터 r_m 을 이용하여 질량중심의 위치변화를 나타내기 위해서는 전체 수중글라이더의 질량 m_{total} 을 선체의 질량 m_{hull} , 내부 구성품의 질량 m_{stat} , 이동질량체의 질량 m_{mov} 으로 나누어야 한다. 그러므로 전체 수중글라이더의 질량은 식 4.33과 같다.

$$m_{total} = m_{hull} + m_{stat} + m_{mov} \quad (4.33)$$

식 4.32과 식 4.33을 이용하여 선체고정좌표계의 원점 O 에서 질량중심까지의 위치벡터 r_{cg} 는 다음과 식 4.34와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{cg} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \frac{m_{hull}r_h + m_{stat}r_s + m_{mov}r_m}{m_{total}} \quad (4.34)$$

식 4.34의 위치벡터 r_h , r_{stat} 는 각각의 질량의 선체고정좌표계의 원점 O 에서 질량중심까지의 위치벡터이다.

또한 질량관성모멘트의 변화를 고려하기 위하여 질량관성모멘트의 변화를 식 4.35와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_O = (I_{hull} - m_{hull}\hat{r}_h\hat{r}_h) + (I_{stat} - m_{stat}\hat{r}_s\hat{r}_s) + (I_{mov} - m_{mov}\hat{r}_m\hat{r}_m) \quad (4.35)$$

식 4.35에서 $\hat{}$ 는 skew symmetric matrix를 나타내는 기호이다.

위에서 유도한 자세제어기에 의한 질량중심과 질량관성모멘트의 변화속도를 고려하기 위하여 자세제어기의 내부 이동질량체의 이동속도를 모델링하였으며 식 4.36, 4.37과 같은 전동모터의 수학적모델링을 사용하였다.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J}(K_t i - b \frac{d\theta}{dt}) \quad (4.36)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri + V - K_e \frac{d\theta}{dt}) \quad (4.37)$$

식 4.36과 4.37에 사용된 파라미터는 Table 4.3에 정리 하였다.

Table 4.3 Parameter for Electric motor

| Parameter | Description |
|-----------|---------------------------------|
| J | Moment of inertia of the rotor |
| b | Motor viscous friction constant |
| K_e | Electromotive force constant |
| K_t | Motor torque constant |
| R | Electric resistance |
| L | Electric inductance |

내부 이동질량체의 전후운동시 이동속도는 전동 모터의 각속도와 볼스크류의 이송리드 감속기의 기어비에 의해 결정된다. 이를 식으로 나타내면 식 4.38과 같다.

$$v_{tmov} = \omega \cdot \eta_n \cdot L_{Lead} \quad (4.38)$$

식 4.38에 ω 는 전동모터의 각속도, η_n 은 감속기의 기어비, L_{Lead} 는 볼스크류의 리드 길이이다.

또한 자세제어기가 회전운동시에 내부이동질량체의 이동속도는 식 4.39와 같다.

$$v_{ov} = \omega \cdot \eta_n \quad (4.39)$$

자세제어기의 회전운동은 전동모터의 회전과 감속기의 기어비에 의해 결정된다.

앞절에서 유도한 운동방정식에 위와 같이 고려한 수중글라이더의 특성을 반영시키면 식 4.20에서의 질량중심 벡터 $r_{cg} = [x_G y_G z_G]^T$ 와 질량관성 모멘트 I_O 가 실시간으로 변화하게 된다. 또한 우항의 유체력에 관한 식은 식 4.40과 나타낼 수 있으며 각항에는 정유체력과 관련된 중력과 부력항 동유체력 관련된 부가질량 유체력, 점성감쇠 유체력, 선형감쇠 유체력등 속도와 가속도에 의해 발생하는 항들로 구성되어 있다.

$$\begin{aligned}
 X &= X_{u|u}|u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr - (W - B)\sin\theta \\
 Y &= Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{\phi}\phi + Y_{pq}pq + Y_{uw}uw \\
 &\quad + (W - B)\cos\theta\sin\phi \\
 Z &= Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw \\
 &\quad + (W - B)\cos\theta\cos\phi \\
 K &= K_{p|p}|p|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + (y_G W - y_B B)\cos\theta\cos\phi - (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \\
 M &= M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw \\
 &\quad - (z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi \\
 N &= N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uw}uw \\
 &\quad + (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi + (y_G W - y_B B)\sin\theta
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

4.4 유체력 미계수의 추정

위와 같이 수중글라이더의 운동 방정식을 유도하고 운동 모델링시 실시간으로 변화하는 부분의 변화 속도 또한 모델링에 포함 시켰다. 수중글라이더의 운동 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 유체에서 운동시 작용하는 유체력이 필요하며 발생하는 유체력은 속도와 가속도, 유체력 계수에 관한 항으로 표현할 수 있다. 유체력 계수는 전산유체역학(CFD)해석과 경험식을 이용한 추정, PMM 실험과 Rotating arm 실험을 통해서 추정할 수 있으며 본 논문에서는 PMM 실험을 이용하여 유체력 미계수를 추정하였다.[13]

4.4.1 VPMM 시험

본 논문의 VPMM 시험은 부산대에서 시험 하였으며 시험 장비의 다이어그램은 Fig. 4.5와 같다.

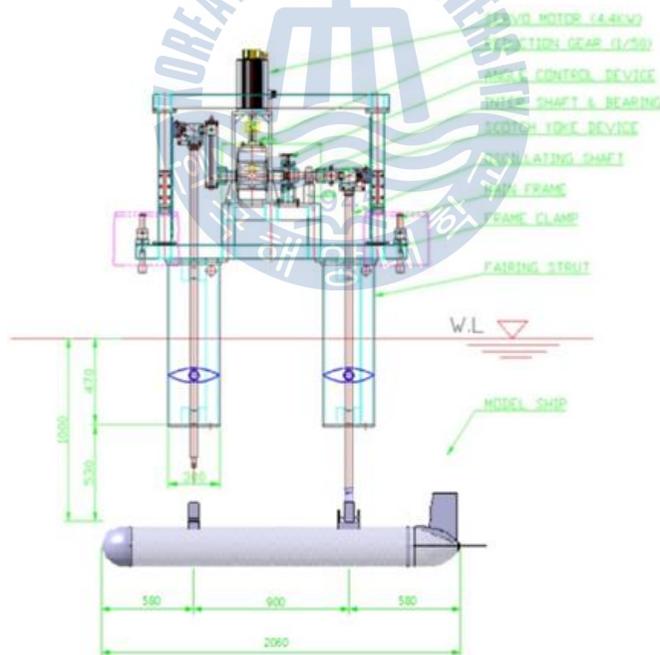


Fig. 4.5 Schematic diagram of VPMM

시험에 사용된 장비의 제원은 Table 4.4에 정리하였다.

Table 4.4 Specification of VPMM equipment

| Item | Specification |
|-------------------|---------------------------------|
| Test model | $L = 1 \sim 3m$ |
| Test speed | $U = 0.5 \sim 2.0m/s$ |
| Pure heave motion | $\pm 0.05m \sim \pm 0.25m$ |
| Pure pitch motion | $\pm 0^\circ \sim \pm 10^\circ$ |
| Strut type | 2-streamline shape strut |
| Control motor | Servo motor 1 set |
| Reduction motor | Worm reducer |
| Control system | Oscillation control |

실제 장비와 실험 모습은 Fig. 4.6과 같다.



(a) VPMM equipment

(b) Underwater glider test model

Fig. 4.6 VPMM Test

VPMM 실험을 수행하기 위하여 좌표계를 설정하고 실험 조건을 정하여 실험을 수행하였으며 좌표계는 Fig. 4.7과 같고 조건은 Table 4.5와 같다.

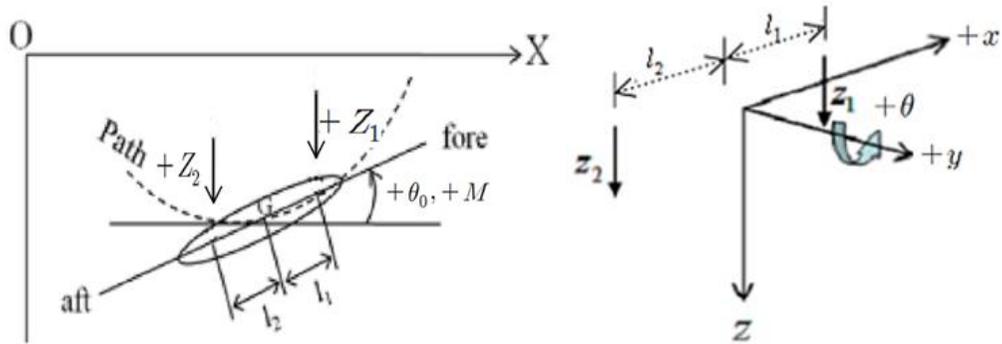


Fig. 4.7 Right-handed coordinate system for VPMM test

Table 4.5 VPMM test conditions

| Test | Cycle | Velocity | Heave amplitude |
|------|------------------|----------|-----------------|
| VPMM | 5,6,7,8,9,10 sec | 1m/s | 0.05m |

위의 VPMM 실험을 통해 Heave와 Pitch의 Linear motion에 대한 힘에 대한 계수를 추정할수 있으며 Pure Heave motion에 대한 모식도는 Fig. 4.8과 같다.

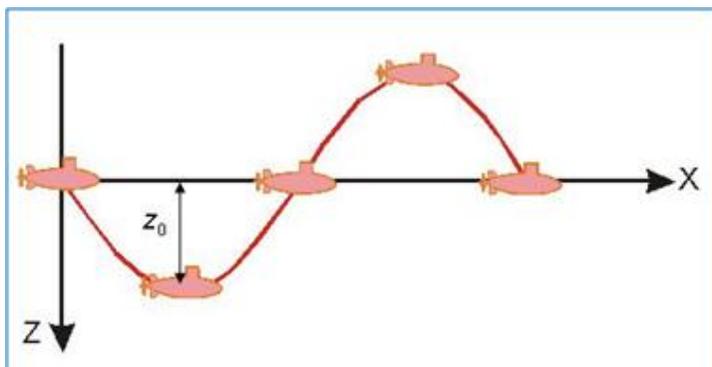


Fig. 4.8 Pure heave motion

Pure heave motion에 관한 운동방정식은 식 4.41~4.43과 같다.

$$z = z_0 \sin \omega t \quad (4.41)$$

$$w = \dot{z} = z_0 \omega \cos \omega t \quad (4.42)$$

$$\dot{w} = -z_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (4.43)$$

또한 Pure pitch motion에 대한 모식도는 Fig. 4.9와 같다.

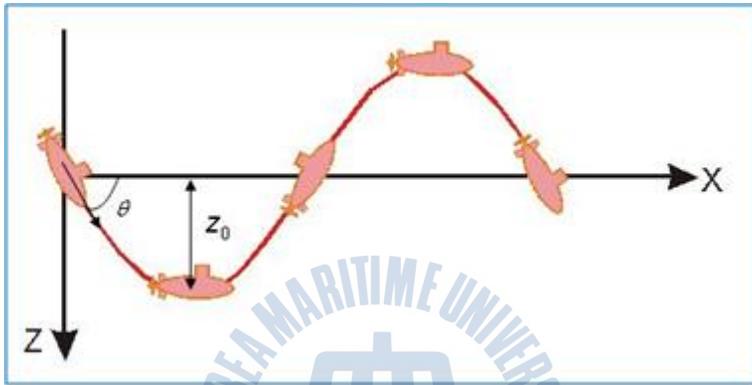


Fig. 4.9 Pure pitch motion

운동방정식은 식 4.44~4.48과 같다.

$$z = z_0 \sin \omega t \quad (4.44)$$

$$\theta = \theta_0 \cos \omega t \quad (4.45)$$

$$\theta_0 = \frac{z_0 \omega}{U} \quad (4.46)$$

$$q = -\theta_0 \omega \sin \omega t \quad (4.47)$$

$$\dot{q} = -\theta_0 \omega^2 \cos \omega t \quad (4.48)$$

Pure heave motion에서 다음과 같은 식 4.49와 식 4.50을 이용하여 유체력 계수를 추정할 수 있다.

$$(m - Z_w)(-z_O \omega^2 \sin \omega t) - Z_w(z_O \omega \cos \omega t) = Z_E \quad (4.49)$$

$$-(mx_G + M_w)(-z_O \omega^2 \sin \omega t) - M_w(z_O \omega \cos \omega t) = M_E \quad (4.50)$$

위의 식 4.49와 식 4.50에서 Z_E 와 M_E 을 운동의 동위상성분과 반위상성분으로 분리하면 식 4.51과 식 4.52와 같다.

$$Z_E = Z_{in} \sin \omega t + Z_{out} \cos \omega t \quad (4.51)$$

$$M_E = M_{in} \sin \omega t + M_{out} \cos \omega t \quad (4.52)$$

식 4.49~4.52을 이용하여 다음과 같이 식 4.53~4.56으로 나타낼 수 있다.

$$m - Z_w = -\frac{Z_{in}}{z_O \omega^2} \quad (4.53)$$

$$Z_w = -\frac{Z_{out}}{z_O \omega} \quad (4.54)$$

$$mx_G + M_w = \frac{M_{in}}{z_O \omega^2} \quad (4.55)$$

$$M_w = -\frac{M_{out}}{z_O \omega} \quad (4.56)$$

위의 4.53~4.56의 식을 이용하여 유체력계수 Z_w, Z_w, M_w, M_w 를 추정할 수 있다.

또한 Pure pitch motion에서 다음과 같은 식 4.57과 식 4.58을 이용하여 유체력계수를 추정할 수 있다.

$$-(mx_G + Z_q)(-\theta_O \omega^2 \cos \omega t) - (Z_q + mU)(-\theta_O \omega \sin \omega t) = Z_E \quad (4.57)$$

$$(I_{yy} - M_q)(-\theta_O \omega^2 \cos \omega t) - (M_q - mx_G U)(-\theta_O \omega \sin \omega t) = M_E \quad (4.58)$$

이때 Z_E 와 M_E 를 운동의 동위상 성분과 반위상성분으로 분리하면 식 4.59와 식 4.60과 같다.

$$Z_E = Z_{\in} \cos \omega t + Z_{out} \sin \omega t \quad (4.59)$$

$$M_E = M_{\in} \cos \omega t + M_{out} \sin \omega t \quad (4.60)$$

식 4.57~4.60을 이용하여 다음과 같은 식 4.61~4.64로 나타낼 수 있다.

$$m x_G + Z_q = \frac{Z_{in}}{\theta_O \omega^2} \quad (4.61)$$

$$Z_q + m U = \frac{Z_{out}}{\theta_O \omega} \quad (4.62)$$

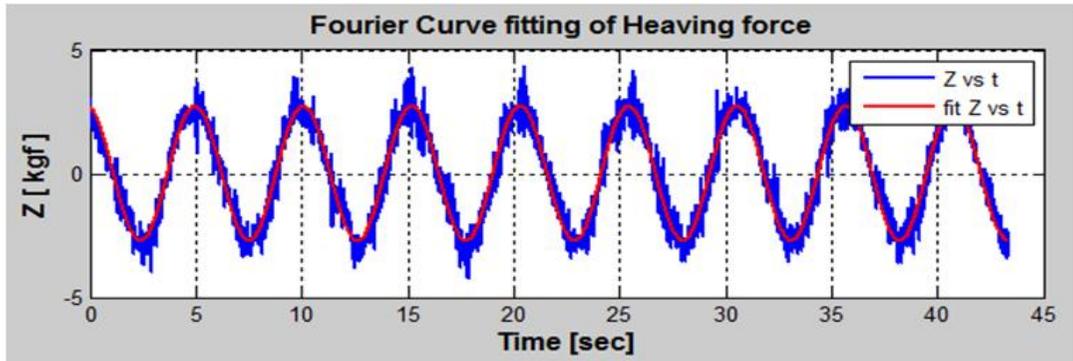
$$I_{yy} - M_q = - \frac{M_{\in}}{\theta_O \omega^2} \quad (4.63)$$

$$M_q - m x_G U = \frac{M_{out}}{\theta_O \omega} \quad (4.64)$$

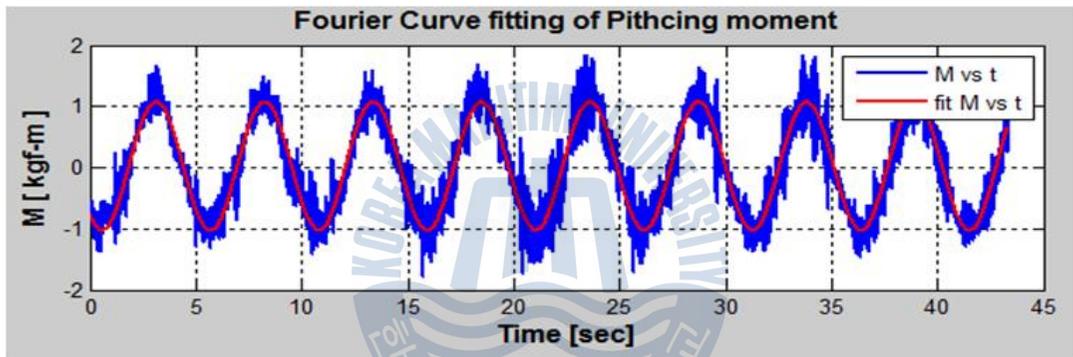
위의 식 4.61~4.64를 이용하여 유체력계수 Z_q, Z_q', M_q, M_q' 를 추정할 수 있다.



앞서 설명 유체력 계수 추정식을 이용하여 실험한테이터를 분석하여 실제 유체력계수를 추정하게 되며 실험데이터는 Fig. 4.10과 같다.



(a) Comparison of original heaving force with fourier analysis



(b) Comparison of original pitching moment with fourier analysis

Fig. 4.10 VPMM test data

4.5 6자유도 비선형 운동 시뮬레이션 및 해석

수중글라이더의 6자유도 비선형 운동방정식과 부력제어기 자세제어기의 운동 모델링, PMM 시험을 통해 추정된 유체력계수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 matlab/simulink를 사용하여 시뮬레이터를 구성하였다. 시뮬레이션에서 유체의 경계조건 고려하지 않았으며 제어 입력은 부력제어기의 피스톤위치와 자세제어기의 이동질량체 위치를 제어 입력으로 하였다. 또한 PID제어기를 이용하여 수심제어, 중동요각 제어, 선수제어각 제어를 수행하였다. 또한 부력제어량을 실제 실험과 같은양으로 제어하여 운동성능을 시뮬레이션과 비교해보았다.

4.5.1 시뮬레이터의 구성

시뮬레이터는 matlab/simulink를 사용하여 구성하였으며 운동방정식과 유체력식을 이용하여 수중글라이더의 속도와 각도를 구하고 이를 다시 피드백 시켜 시간에 따른 속도와 각도를 확인할 수 있도록 구성하였다. 시뮬레이터의 블럭 다이어그램은 Fig. 4.11과 같다.

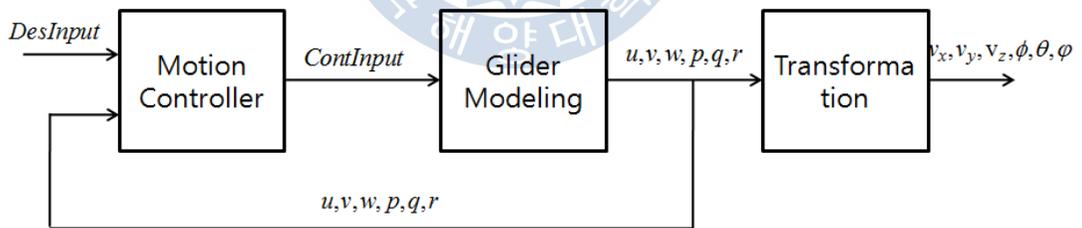


Fig. 4.11 Block diagram of simulator

4.5.2 PID 제어기 설계

일반적인 PID 제어기를 설계하여 수중글라이더의 제어를 수행하였다. PID 제어기는 P는 비례계인, I는 적분계인, D는 미분계인을 나타내며 원하는 목표값을 추정하기 위하여 현재 값과 목표값의 에러를 이용한 제어기이다. 수중글라이더에서는 부력엔진의 피스톤은 별다른 제어없이 전진과 후진운동만 하게 되며 이때 자세를 제어하기 위하여 PID제어기를 사용하여 글라이더의 자세제어기를 제어하게 된다. 자세제어기의 내부 이동질량의 위치에 의해 pitch각도와 roll각도, yaw각도를 제어하게 된다.

PID 제어기를 설계하기 위하여 다음과 같이 식 4.65와 식 4.66을 사용하였다.

$$u_p = K_{pp} \cdot e_\theta + K_\pi \cdot \int e_\theta dt + K_{pd} \cdot \dot{e}_\phi \quad (4.65)$$

$$u_y = K_{yp} \cdot e_\psi + K_{yi} \cdot \int e_\psi dt + K_{yd} \cdot \dot{e}_\psi \quad (4.66)$$

PID 제어기를 블록 다이어그램으로 나타내면 Fig. 4.12와 같다.

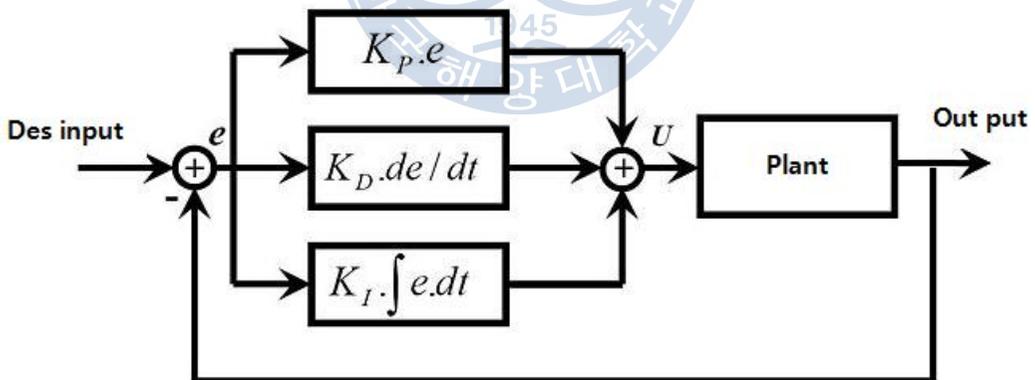


Fig. 4.12 PID controller block diagram

4.5.3 수직운동 시뮬레이션

글라이더의 부력엔진과 자세제어기에 의한 운동특성을 확인하기 위하여 제어기를 이용하지 않고 부력엔진과 자세제어기의 운동만을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 부력엔진의 피스톤과 자세제어기의 내부이동 질량체가 각각의 기구의 중심에 있을 때 수중글라이더는 평형이 되어 수면과 평행하게 위치하게 된다. 이때 부력엔진의 피스톤은 중립에 두고 자세제어기의 이동질량체를 선수 방향으로 최대 이동시켰을시 Fig. 4.13와 같은 방향각 그래프를 얻을 수 있다.

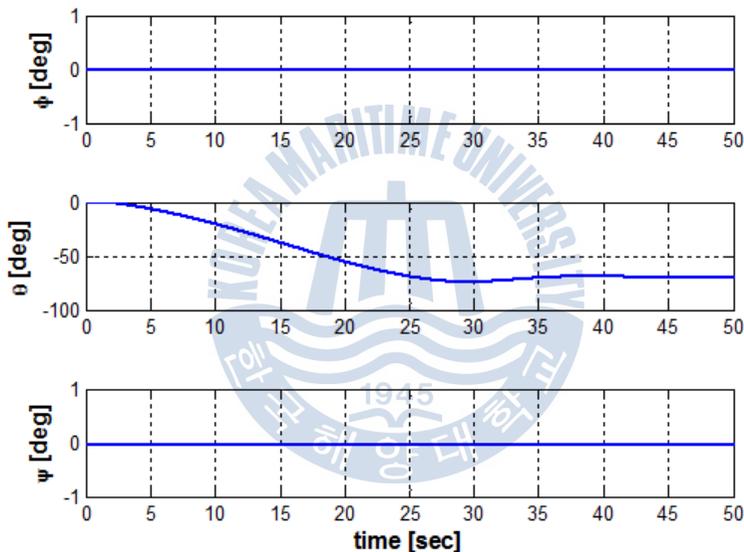
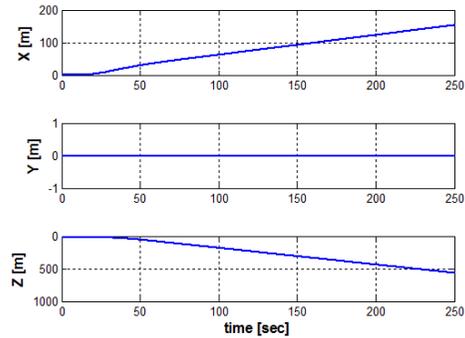


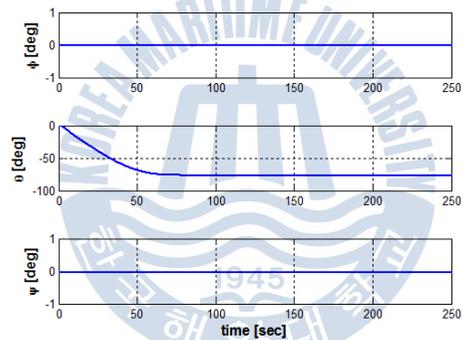
Fig. 4.13 Angle of underwater glider when buoyancy piston located neutral point

Fig. 4.13에서 확인할수 있듯 자세제어기만을 이용하였을 때 글라이더의 최대 pitch 각도는 약 -70° 를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 수면에 부상하였을시 모선과 통신하기 위하여 꼬리 안테나를 수면 밖으로 노출시킬 때 필요한 자세 각도를 자세제어기만을 이용하여 만들 수 있다는 것을 나타낸다.

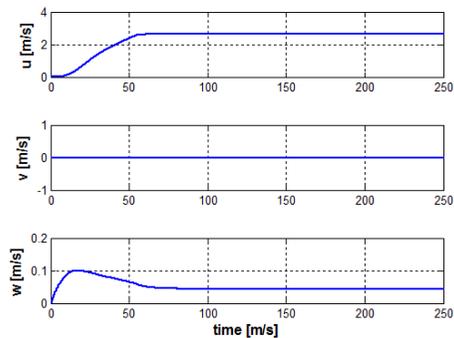
또한 자세제어기의 이동질량체의 위치를 중심점에 두고 부력엔진 피스톤을 이동시켜 운동특성을 확인 하였다. 피스톤의 위치를 후진 시켜 체적을 최소로 줄였을 때 의 그래프는 Fig. 4.14과 같다.



(a) Translational distance



(b) Rotational angle



(c) Translational velocity

Fig. 4.14 Underwater glider motion according to buoyancy piston

Fig. 4.14 (a),(b)에서 약 50초 후에 수중글라이더 정상상태에 도달하게 되며 이때 선체고정좌표계의 x_O 방향의 속도 u 가 약 $2.3m/s$ 가 됨을 확인 할 수 있고 그때의 pitch 각은 약 -78° 가 되는 것을 알수 있다. 수중글라이더의 슬로프 각도는 약 -31.2° 이며 지구고정좌표계의 x_E 방향의 속도는 $1.2m/s$ 이다. 이때의 자세제어기의 이동질량체와 부력엔진의 피스톤 위치는 Fig. 4.15와 같다.

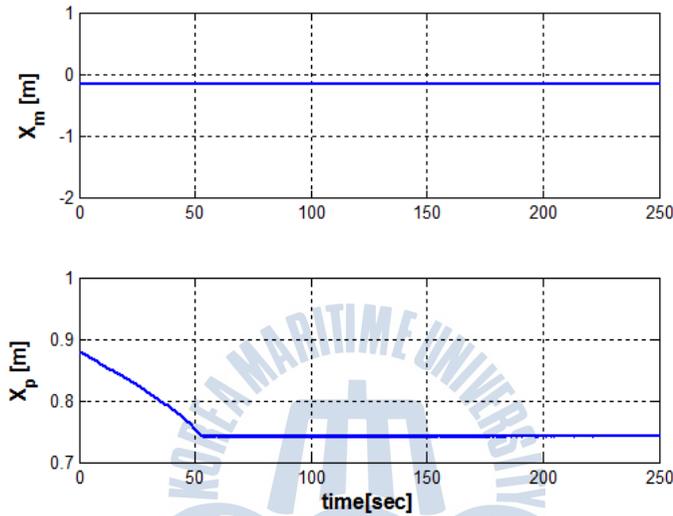
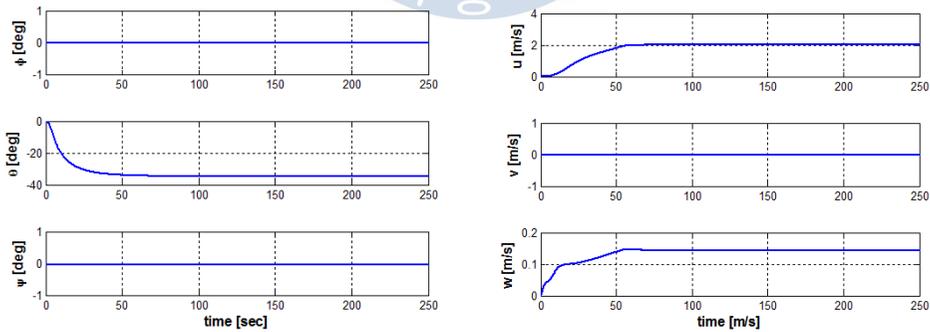


Fig. 4.15 Location of inner moving mass and buoyancy piston



(a) Rotational angle

(b) Translational velocity

Fig. 4.16 Maximum velocity of underwater glider in Earth coordinate system

수중글라이더가 정상상태일때의 최대 속도를 확인하기 위해서 수중글라이더가 지구고정좌표계를 기준으로 하였을 시 최대속도를 가지는 pitch 각도로 제어를 하여 시뮬레이션을 수행 했다. 시뮬레이션 그래프는 Fig. 4.16와 같다. 선체의 Pitch 각도를 -34° 로 제어 하였을시 수중 글라이더의 선체 방향의 속도 u 와 수심방향의 속도 w 를 글라이더의 합이 최대가 되는 수중 글라이더 슬로프가 생성되며 이때의 지구고정좌표계의 x_E 방향의 최고속도는 1.5m/s가 된다.

또한 깊은 수심이 아닌 근해에서의 글라이더의 운동성능을 확인하기위하여 부력제어량을 전진과 후진시 각각 20mm씩 이동하게 하였으며 목표 수심 하한인 10m에 도달 하였을 시 피스톤이 전진하여 부상시키고 목표 수심 상한인 2m에 도달하였을 시 피스톤을 후진시켜 잠항되도록 부력엔진을 제어 하였다. 자세제어기의 이동질량체를 전후로 이동시켜 pitch각도를 제어하도록 하였으며 PID제어기를 사용하여 목표 pitch각도를 하강시 -20° , 상승시 20° 가 되도록 제어를 수행하였다. 그때의 그래프는 Fig. 4.17과 같다.

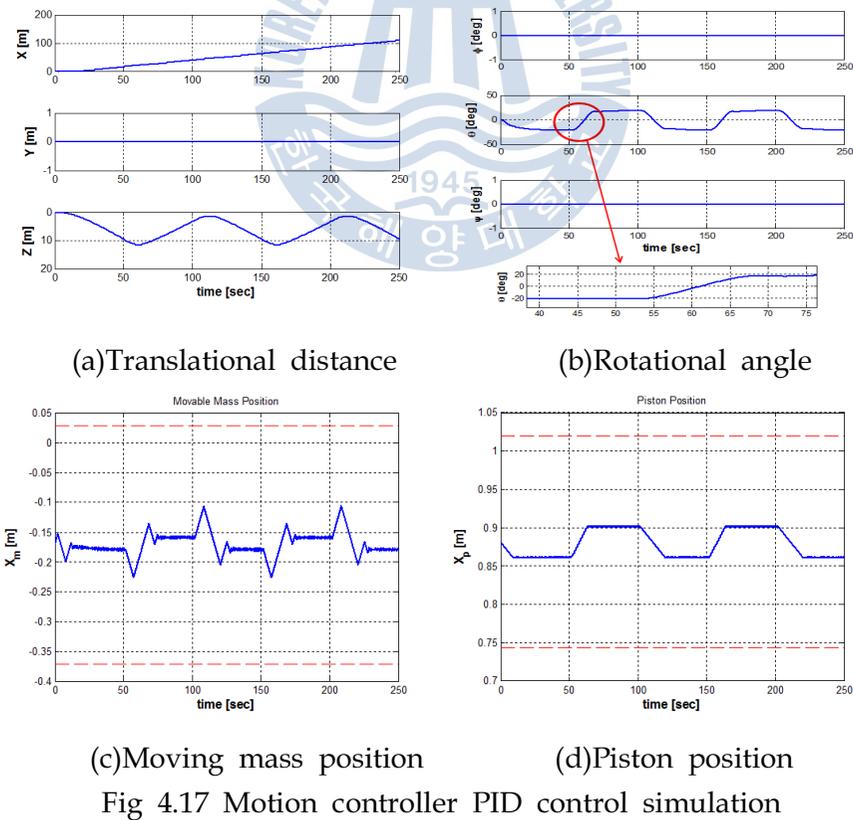


Fig. 4.17(a)에서 Z_E 방향의 그래프를 보면 하한 수심 10m와 상한 수심 2m에서 상승 하강 운동을 반복하는 것을 확인 할수 있다. 또한 Fig. 4.17(b)에서 pitch각도 하강시 -20° , 상승시 20° 를 추정하는 것을 확인할 수 있다.

4.5.4 수평운동 시뮬레이션

수중글라이더의 회전 반경, 방향각 제어성 등을 확인 하기위하여 수평방향의 시뮬레이션을 수행하였다. 부력엔진의 부력제어량이 일정하고 상승과 하강시에 일정한 pitch각도를 가질 때 자세제어기의 회전에 의해 발생하는 수중 글라이더 roll각에 의해 방향각이 변화 하게 되며 일정한 상승과 하강시에 roll각도가 일정하게 제어되면 선회 운동을 하게 된다. 시뮬레이션 그래프는 Fig. 4.18과 같다. [15]

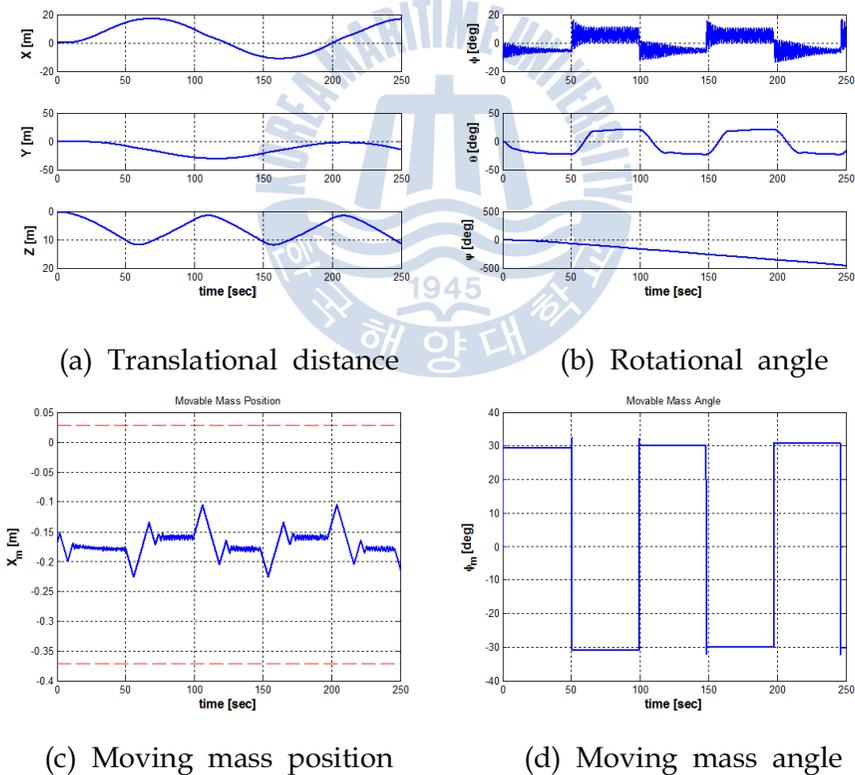


Fig 4.18 Horizontal motion of glider

수평면 시뮬레이션에서 내부 이동질량체의 회전각도는 하강시 30° , 상승시 -30° 로 하였으며 이때 수중 글라이더는 진동현상을 나타내며 약 -10° 와 10° 를 가지는 것을 확인 할 수 있다. 진동이 발생하는 것은 시뮬레이션에 사용된 회전에 관한 유체력 계수가 PMM 실험으로는 추정하지 못하여 경험식을 이용한 계수를 사용하여 발생한 현상이다.

이때 2차원 궤적과 3차원 궤적은 Fig. 4.19와 같다.

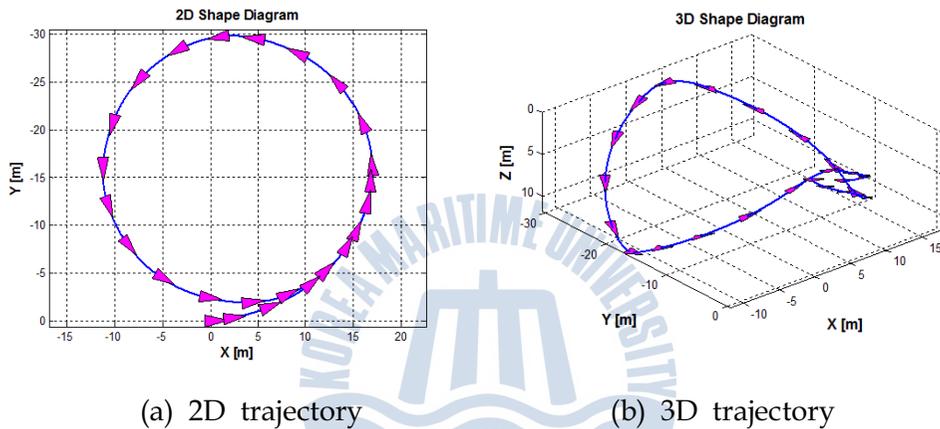
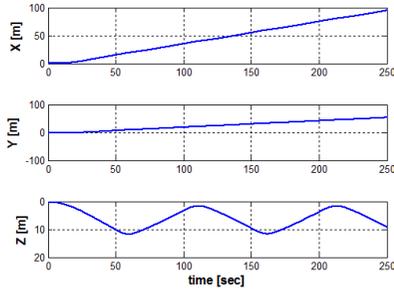


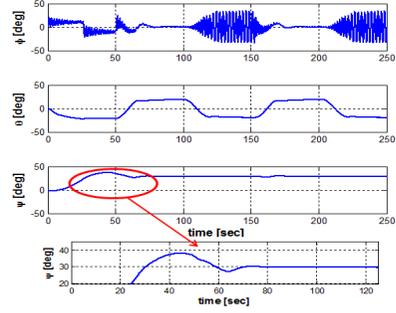
Fig. 4.19 Trajectory of underwater glider

Fig. 4.19의 (a) 그래프에서 회전반경은 약 $15m$ 이다. (b) 그래프에서는 상승하강운동을 하면서 선회를 하는 모습을 확인할 수 있다.

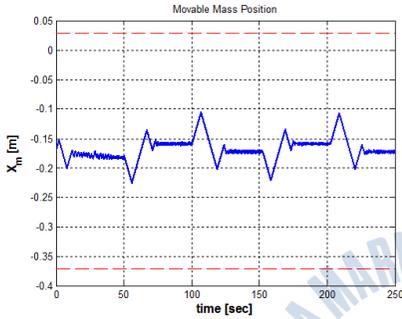
수중글라이더가 수중에서 원하는 경유점을 찾기 위해서는 목표 방향각을 추정할 수 있어야하며 이때의 운동특성을 확인 하기 위하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 목표 방향각은 30° 로 하여 부력 피스톤의 제어는 전진 후진 Open loop 제어를 수행하였으며 pitch 각도는 하강시 -20° , 상승시 20° 로 제어를 하였다. 방향각 제어 시뮬레이션 그래프는 Fig. 4.20과 같다.



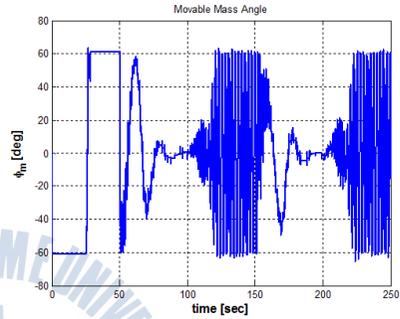
(a) Translational distance



(b) Rotational angle



(c) Moving mass position

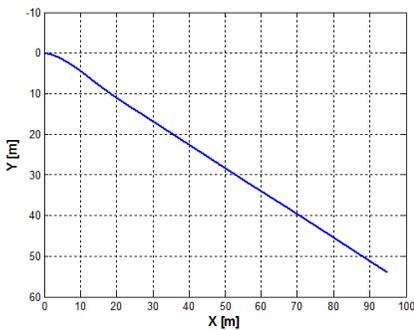


(d) Moving mass angle

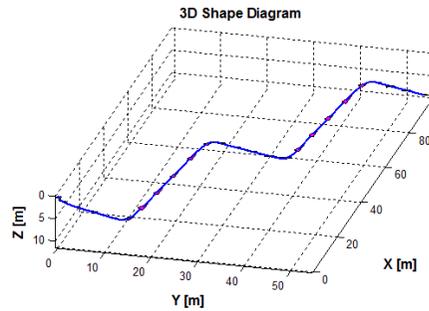
Fig. 4.20 Heading control of underwater glider

Fig. 4.20의 (b) 그래프에서 yaw 각도가 30° 로 수렴하는 것을 확인 할수 있으며 (d)에서 자세제어기의 회전각도를 확인할 수 있다.

이때의 수평면 궤적은 Fig. 4.21과 같다.



(a) 2D trajectory



(b) 3D trajectory

Fig. 4.21 Heading control trajectory

방향각제어를 이용하여 방향각을 30° , -30° 를 추정하게 하도록 시뮬레이션을 수행 하였고 그래프는 Fig. 4.22와 같다.

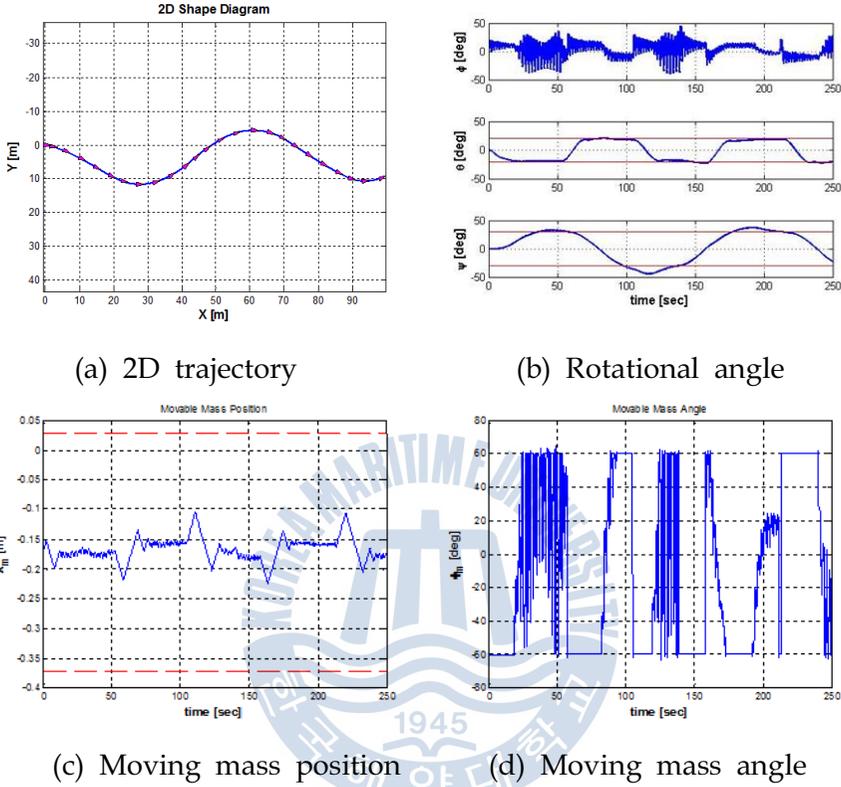
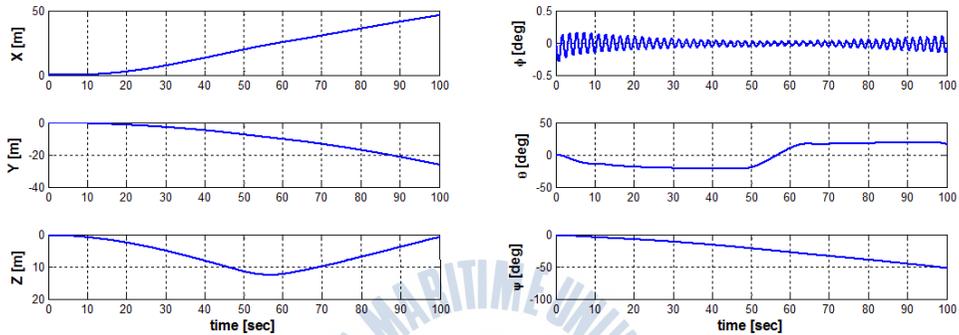


Fig. 4.22 Zig-Zag control of underwater glider

Fig. 4.22 그래프(b)에서 목표 방향각에 도달하면 바로 다음 목표 방향각으로 추정하는 것을 확인할 수 있으며 상승과 하강운동이 바뀌는 지점에서 오버슈트가 많이 발생하는 것으로 나타나며 이는 수중글라이더의 선체의 속도가 선체를 회전시키기에 충분하지 않은 속도를 가지기 때문으로 판단된다. 또한 방향각제어가 가능함으로 실제 실험에서 자신의 위치를 알수 있다면 원하는 목표점까지 방향각을 제어하여 도달할 수 있다고 판단된다.

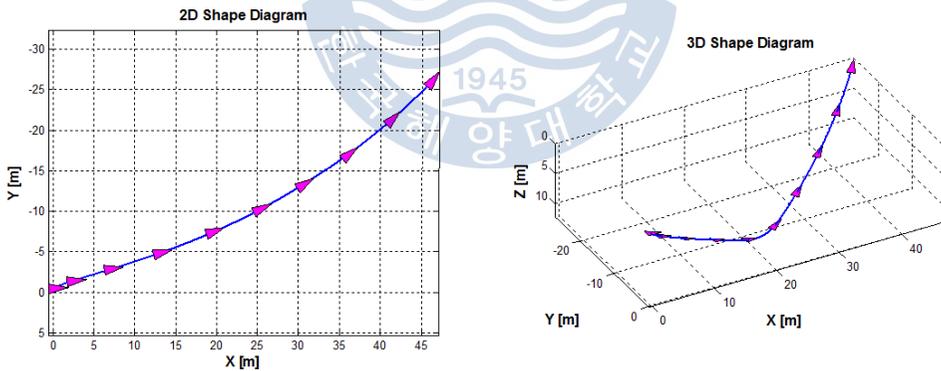
수중글라이더가 수중에서 활강중 외란의 영향에 의한 운동특성을 확인 하기 위하여 2차원의 수평면에 대한 외란을 가한 시뮬레이션을 수행하였다.

2차원 수평면에 작용하는 외란은 일정한 방향과 유속을 가지는 조류 외란으로 가정하여 시뮬레이션을 수행 하였으며 가상의 조류는 -30° 방향의 $0.2m/s$ 의 유속을 갖는 조류로 설정하였으며 자세제어의 회전각도는 0° 로 하고 pitch각도는 $-20^\circ, 20^\circ$ 를 추정하도록 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 그래프는 Fig. 4.23과 같다.



(a) Translational distance

(b) Rotational angle

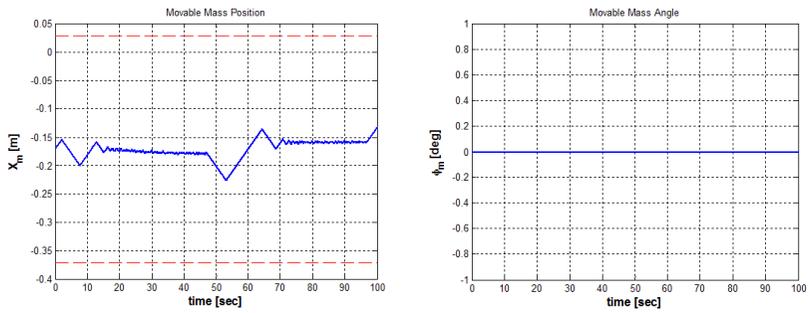


(c) 2D trajectory

(d) 3D trajectory

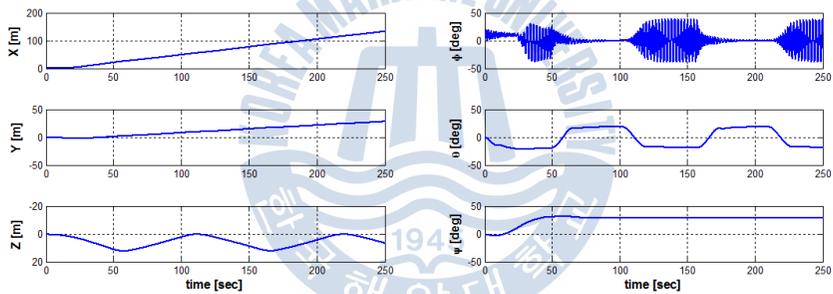
Fig. 4.23 Current disturbance acting on underwater glider

이때의 수중글라이더의 자세제어기 위치는 Fig. 4.24와 같다.

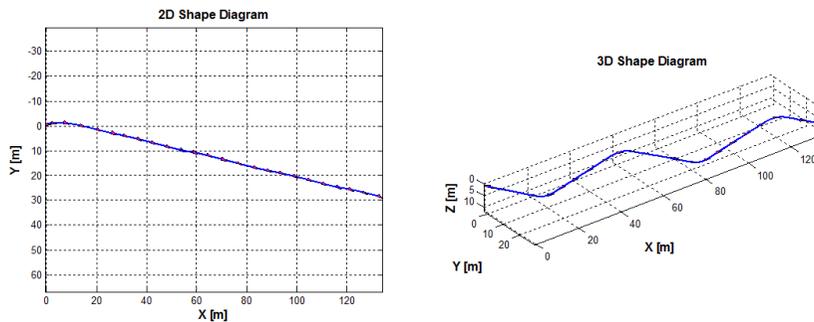


(a) Moving mass position (b) Moving mass angel
Fig. 4.24 Moving mass location

외란이 있을시 방향각 제어를 수행하였고 목표 방향각은 30° 가 되도록 제어를 수행 하였다. 시뮬레이션의 결과는 Fig. 4.25와 같다.



(a) Translational distance (b) Rotational angle



(c) 2D trajectory (d) 3D trajectory

Fig. 4.25 Heading control in disturbance

외란이 없을 경우와 비교 하였을 때 목표 방향각 30에 도달하는 시간은 비슷하나 2차원 궤적에서 차이를 나타낸다. 외란이 작용하여도 목표 방향각 추정을 하지만 글라이더의 이동 궤적이 밀려나게 되는 것을 확인할 수 있다.



제 5 장 수중글라이더 실험

본 논문의 실험은 수중글라이더의 운동성능을 확인하기 위한 기초 실험으로써 설계 및 제작된 수중 글라이더의 각종 센서의 동작, 센서 융합 알고리즘, 운동특성 확인에 중점을 두었다.

실해역 실험에 실제 사용된 수중글라이더의 외형은 Fig. 5.1와 같으며 제원은 Table 5.1에 정리하였다.



Fig. 5.1 Underwater glider

Table 5.1 Specification of Underwater Glider

| | Specification |
|------------------|---------------------|
| Speed | 3kts |
| Be Volume | 3.5L |
| Battery Cap. | Li Polymer |
| | 3.5MJ |
| | 10kg |
| Sat Comms | CDMA |
| Weight | 60kg |
| Op. Depth | 200m |
| Mission Duration | 33h |
| | Buoyancy ratio 0.11 |

실제 수중글라이더 제작에 사용된 상용센서, 제어보드와 통신모듈은 Fig. 5.2 과 같으며 제어보드의 제원은 Table 5.2에 정리하였다.

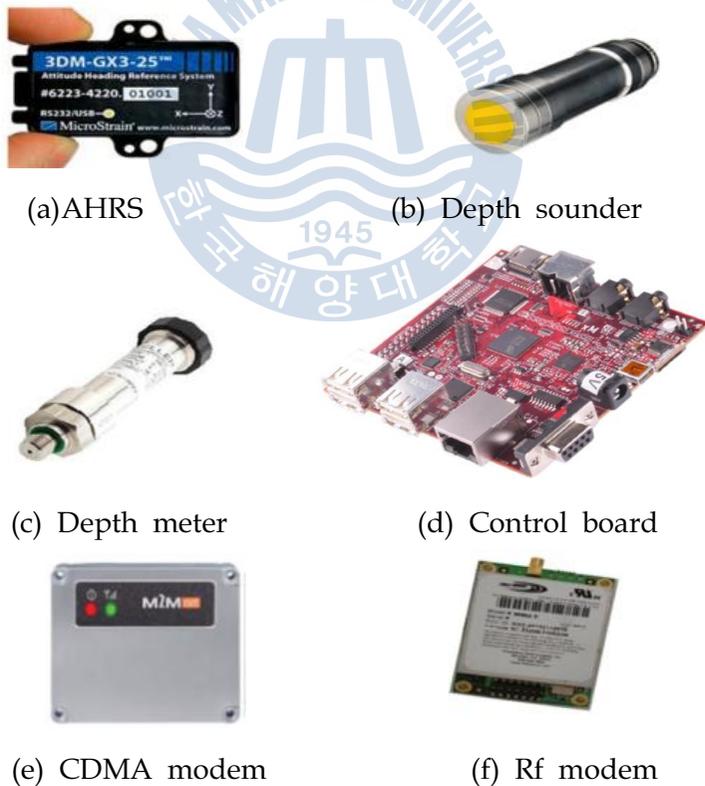


Fig. 5.2 Sensors, control board and communication modems

Table 5.2 Specification of control board

| AREA | BeagleBoard-xM |
|---------------------------|----------------|
| Processor | DM3730 |
| ARM Frequency | 1GHZ |
| DSP Frequency | 800Mhz |
| SGX Frequency | 200Mhz |
| DDR | 512MB |
| DDR Speed | 166MHz |
| NAND | 0 |
| SD Connector | uSD |
| USB Host Ports | 4 |
| Host Port Speed | FS/LS/HS |
| Serial Connector | DB9 |
| Camera Header | Yes |
| Ships with 4G SD | Yes |
| Overvoltage Protection | Yes |
| Power LED turnoff | Yes |
| Serial Port Power Turnoff | Yes |

위와 같이 제작된 수중글라이더를 이용하여 실험을 수행하였으며 실험역 실험에 앞서 한국해양대학교 실내 풀장과 부산대 예인 수조에서 pitch 각도 제어 및 roll 모션실험을 하였다.

5.1 수조 실험

실해역 실험에 앞서 수중글라이더의 실제 운동특성을 확인하기 위하여 수조 실험을 수행하였다. 실제 수조실험 사진은 Fig. 5.3와 같다. 수조실험에서 pitch 각도의 제어와 자세제어기의 회전에 의한 roll 운동의 발생 및 상승과 하강시에 실제 회전방향 확인을 위한 실험을 하였다. pitch각도 제어실험의 그래프는 Fig. 5.4와 같다.

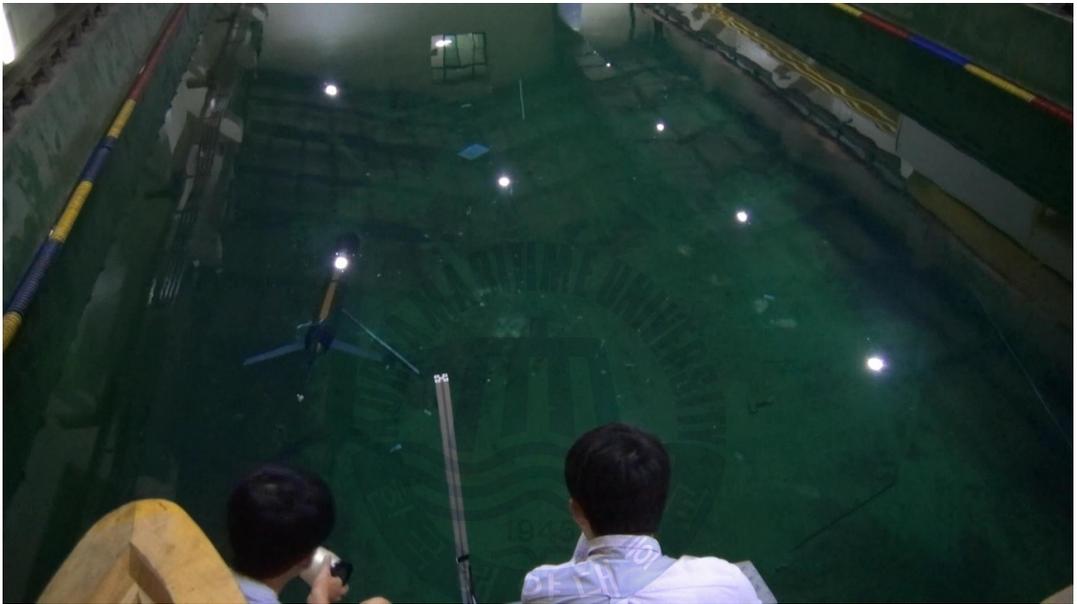


Fig. 5.3 Water Pool test

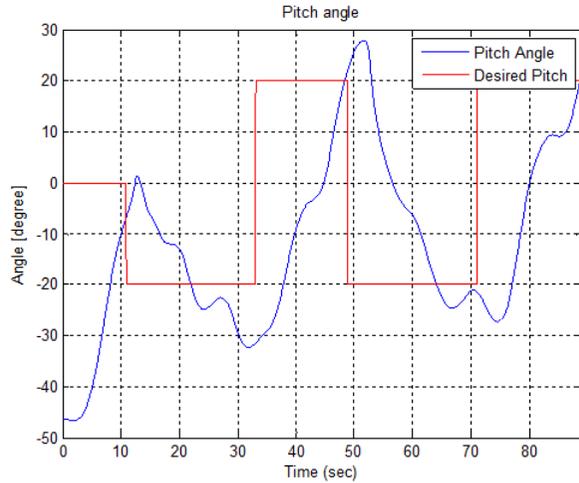
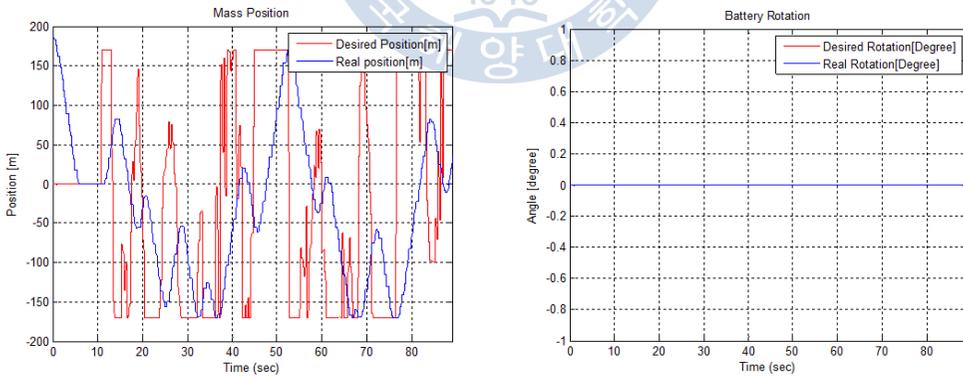


Fig. 5.4 Pitch angle control in water pool test

완벽하게 목표값을 추정하지 못하고 오버슈트 및 정상상태 도달시간이 긴 것을 확인할 수 있으나 정상상태오차가 5° 이내로 목표값을 추정하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5.5의 (a)에서 확인할 수 있듯 자세제어기의 내부 이동질량의 이동속도가 정밀한 제어를 할수 있는 정도의 충분한 속도를 가지지 못하기 때문으로 판단된다.



(a) Mass position

(b) Mass angle

Fig. 5.5 Depth and inner moving mass location

roll 운동에 의한 yaw각도의 변화를 확인하기 위하여 자세제어기의 이동질량체를 회전시켜 실험을 하였다. 실험 그래프는 Fig. 5.6과 같다.

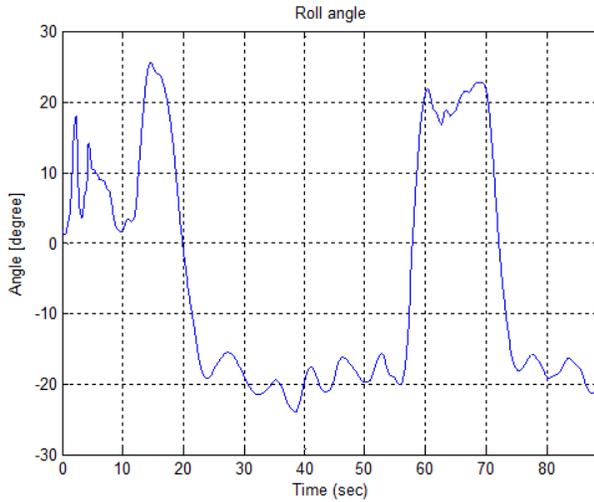
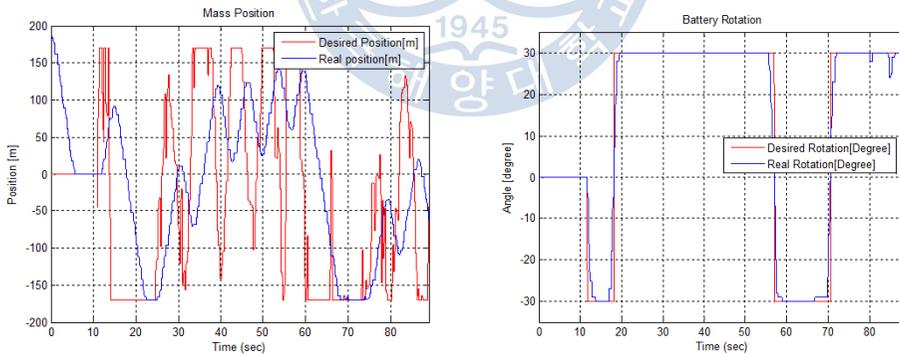


Fig. 5.6 Roll motion in water pool test

자세제어기의 이동질량체를 대칭적으로 회전시켰을 때 다음과 같은 수중글라이더에서 발생하는 roll 각도이다. 자세제어기의 회전에 의해 각도가 -20° , 20° 식 대칭적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이때 자세제어기의 위치는 Fig. 5.7과 같다.



(a) Mass position

(b) Mass angle

Fig. 5.7 Inner moving mass location when roll motion test

Fig. 5.7 (b)에서 보듯이 자세제어기의 회전속도는 목표값을 빠르게 추정하는 것을 보이고 있다.

5.2 실효역 실험

실효역 실험은 한국해양대학교 요트계류장에서 실시하였으며 요트 계류장 주변의 중심은 최소 수심 3m에서 최대 수심5m이다. Fig. 5.8은 실효역 실험 장소를 지도에 표시하였다.



Fig. 5.8 Field test area

실해역에서 pitch 제어성을 확인하기 위하여 실험을 수행하였고 부력엔진은 전진과 후진시에 각각 2cm씩 이동하도록 제어를 하였다. 총 5번의 상하 운동 후에 부상하도록 하여 실험을 수행한 결과는 Fig. 5.9와 같다.

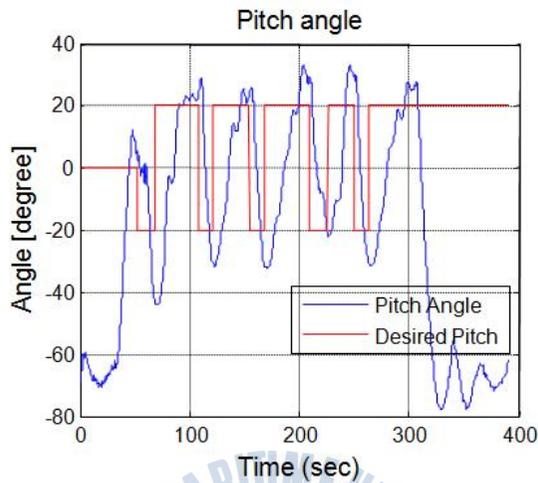


Fig 5.9 Pitch angle in field test

수조 시험때와 비슷한 양상으로 완벽하게 목표값에 수렴하지 않고 오버슈트를 가지는 것을 확인할 수 있으나 오차 각도의 범위와 글라이더의 실제 운용목적에 정밀제어가 아님을 고려 하였을 때 pitch 각도 제어가 가능하다고 판단된다. 이때의 자세제어기의 위치는 Fig. 5.10과 같다.

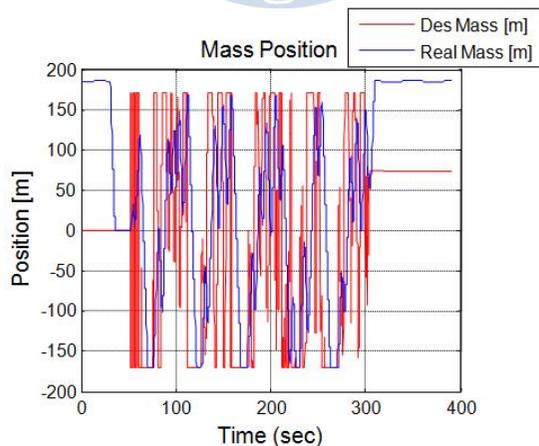


Fig. 5.10 Inner moving mass location in field test

실해역에서 수중글라이더의 방향각제어를 수행하였고 실험데이터는 Fig. 5.11과 같다.

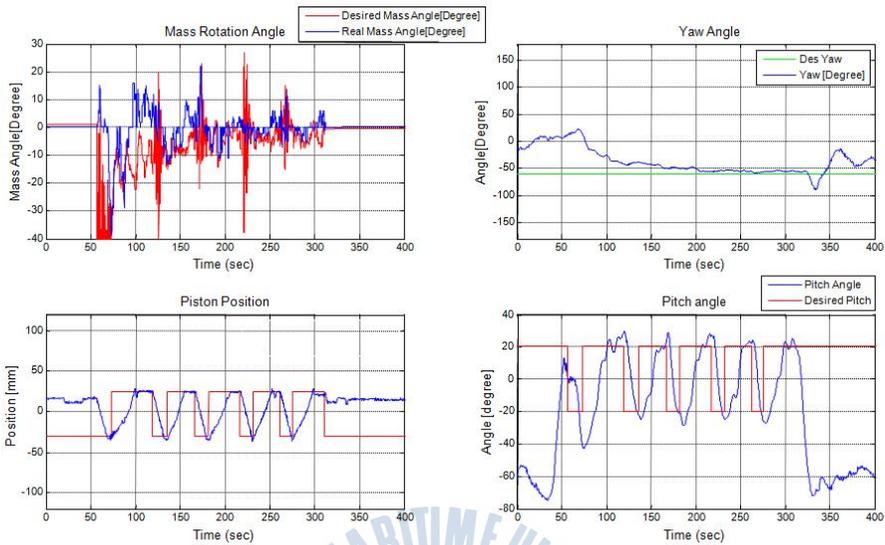


Fig 5.11 Heading control in field test

Yaw angle 그래프에서 보이듯 목표 방향각을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있고 실험을 수행한 수역에서는 초기에 글라이더의 속도가 충분히 발생하기 위해 상승과 하강운동이 1회 정도 필요한 것으로 보이고 있다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 기존 개발된 상용글라이더 보다 빠른 속도를 가지는 수중글라이더를 개발하기 위한 기초 연구로써 운용 목적에 맞는 글라이더를 설계하고 시뮬레이션 및 수조, 실험을 통해 수중글라이더의 운동특성을 확인하였다.

수중글라이더의 선체를 유체의 저항을 최소화 하는 경험식인 myring hull profile equation을 적용하여 설계하였다. 또한 좌굴 해석을 통해 목표 수심에서의 안정성을 해석하였고 설계에 대한 검증을 하였다.

설계된 수중글라이더의 6자유도 비선형 운동방정식을 유도하였다. 유도된 6자유도 비선형 운동방정식과 PMM 실험으로 얻어진 유체력 미계수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 설계된 수중글라이더의 설계사양의 확인 및 수중글라이더의 운동특성을 분석 하였다. 또한 수중글라이더의 부력엔진과 자세제어의 특성을 반영하여 시뮬레이션을 수행하였고 실제 시제를 제작하기 전 설계의 타당성 및 설계 사양의 충족도를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션에서 설계목표 사양중 하나인 최대속도가 $1.5m/s$ 로 충족됨을 확인할 수 있었다.

또한 부력엔진과 자세제어기를 사용하여 수심제어 및 자세제어의 가능성을 확인 하였으며 부력엔진의 피스톤이 일정한 위치로 전진 후진 운동을 할 때 자세제어기 만으로 원하는 pitch각도를 제어할 수있는 것을 검증하였다.

수중글라이더의 방향각 제어를 위해 자세제어기를 회전 시켜 수중글라이더의 roll각이 발생하게되면 수중글라이더에 작용하는 모멘트에 의해 수중글라이더의 방향각을 제어할 수 있음을 시뮬레이션으로 확인 하였다.

또한 시뮬레이션을 이용하여 실제 시제를 제작하기전 수중글라이더 제어 알고리즘을 구현해 봄으로써 실제실험시에 오류를 줄일 수 있었으며 이를 이용해

외란이 거의 없는 수조 실험을 통해 수중글라이더의 운동성능을 직접적으로 확인할 수 있었다.

실해역 실험을 통해서 실제 해역에서 외란이 작용하여도 수중글라이더가 원하는 목표 pitch각도와 heading각도를 추정할 수 있음을 확인 하였고 수중글라이더의 운용 개념을 고려하였을 때 충분한 성능을 가진 수중글라이더라고 판단되었다.

추후 대 수심에서 실해역 실험을 수행하여 시뮬레이션이 아닌 실제로 글라이더가 가지는 최대 속도와 목표방향각추정, 목표점 추정등의 실험과 동시에 수중글라이더에 적합한 항법 알고리즘 개발에 관한 연구를 진행할 계획이다.



참고문헌

- [1] Baumgartner, M.F., & Fratantoni, D.M., 2008. Diel periodicity in both sei whale vocalization rates and the vertical migration of their copepod prey observed from ocean gliders. *Limnol Oceanogr* 53, 2197 - 2209.
- [2] Eriksen, C.C., et al., 2001. Seaglider: A longrange autonomous underwater vehicle for ceanographic research. *IEEE J Oceanic Eng.* 26:424-436.
- [3] Fiorelli, E., Bhatta, P., Leonard, N.E., and Shulman, I., 2003. Adaptive sampling using feedback control of an autonomous underwater glider fleet. *Proc. Symp. Unmanned Untethered Submersible Technology*, pp.1-16.
- [4] Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York.
- [5] Graver, J.G., 2005. *Underwater gliders: dynamics, control and design*. pp 236-238
- [6] Kinsey, J.C., Eustice, R.M. and Whitcomb, L.L., 2006. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges. *Proc. 7th IFAC Conf. Manoeuvring Control Mar. Craft*, pp.1-12.
- [7] Klinck, H., et al. 2011. Passive-acoustic monitoring of odontocetes using a Seaglider: First results of a field test in Hawaiian waters. *J Acoust Soc Am*, 129(4): 2536.
- [8] Leonard, N.E and Graver, J.G., 2001. Model-Based Feedback Control of Autonomous Underwater Gliders. *IEEE. J. of Oceanic Engineering*, Vol 26, No 4, pp 633-645.

- [9] Myring, D.F., 1976. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. *Aeronautical Quarterly*, vol. 27, pp.186-194.
- [10] Roemmich, D.S. Riser, R.D. and Y. Desaubies, 2004. Autonomous profiling floats; workhorse for broad-scale ocean observations. *Mar Tech Soc J.* 38(2).
- [11] Sherman, J., R.E. Davis, W.B. Owens, and J. Valdes, 2001. The autonomous underwater glider "Spray". *IEEE J Oceanic Eng.* 26:437-446.
- [12] Stommel, H., 1989. The slocum mission. *Oceanography*, 2(1): 22-25.
- [13] Tae Hwan Joung, 2014. Application of CFD analysis for Predicting the Hydrodynamic Characteristics and Propulsion Performance of an Autonomous Underwater Vehicle, Ph.D. Adelaide, Flinders University.
- [14] Webb, D.C., Simonetti, P.J., and Clayton, P.J., 2001. SLOCUM: An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy. *IEEE J. Oceanic Eng.* 26:447-452.
- [15] Zhang, S., Yu, J., Zhang, A., and Zhang, F., 2013. Spiraling Motion of Underwater Gliders: Modeling, Analysis, and Experimental Results. *Ocean Engineering*, Vol 60, pp 1-13.

감사의 글

학부생시절 처음 연구실에 들어와 졸업하는 지금까지 4년이라는 시간이 지났습니다. 그동안 옆에서 많은 도움주신 모든 분께 감사드립니다.

옆에서 응원해주시고 좋은 말씀 많이 해주시는 아버지 어머니의 도움으로 무사히 졸업 하게 되어 감사합니다.

처음 실험실에서 연구생으로 시작할 때부터 지금까지 많은 가르쳐주시고 이끌어주신 김준영 교수님 고개숙여 감사드립니다. 많은 조언과 영감을 주신 최형식 교수님 감사드립니다. 다른여러 교수님들이 가르침을 주시고 배움에 대한 열정을 더욱 크게 해주셔서 정말 감사드립니다.

연구실에서 많은 도움 주시고 많이 가르쳐주신 WDC 동희형님 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 실험실에 오셔서 많은 조언해주신 승우형님 감사드립니다. 처음 실험실에 들어왔을 때 기초부터 실험까지 많은걸 알려주신 무담냥 성협형님 감사합니다. 내 동기 승민아 힘들고 어려울 때 옆에서 의지할 수 있는 친구로 있어줘서 고맙다. 동호, 영진아 연구실에서 나랑 같이 생활한다고 고생많이 했고 지금도 충분히 잘하고 있지만 앞으로 더 잘해 나갈꺼라고 믿고 많이 도와줘서 고마웠다. 마지막으로 글라이더 실험으로 많은 도움주시고 어려운일 많이 도와주신 이신제 연구원님, 상기형님 감사합니다.

연구실에서 보낸 학부생 2년 석사과정 2년, 4년동안 많은일이 있었습니다. 하지만 제가 느끼기엔 정말 짧고 빠르게 지나간 것처럼 느껴집니다. 졸업을 하고 연구실 생활을 마무리한다고 생각하니 아쉬움이 많이 남습니다. 후에 다들 좋은 모습으로 만나서 연구실을 추억할수 있었으면 좋겠습니다. 감사합니다.

구일신 일일신 우일신(苟日新 日日新 又日新)

-진실로 새로워 져라, 나날이 새로워 져라, 또한 새로워 져라

이는 은나라 시조인 성탕(成湯) 임금의 반명(盤銘)에 새겨져 있는 다음 글귀에서 비롯된 것입니다. 탕왕은 반명이라는 대야에 새겨두고 매일 씻으며 좌우 명으로 삼았습니다. 군자로써 매일 덕을 쌓고 마음을 새롭게 하기위해 새긴 글귀라고 합니다. 이 글귀에서 저는 저 나름대로 느낀바가 있습니다. 새로운 나라를 세워 이미 혁신을 이룬 왕 역시도 매일 변화하고 새롭게 되는것을 게을리 생각 하지않고 마음에 새기고 노력했다는 것과 수천년 전부터 변화와 혁신을 중요하게 생각 했다는 것을 느낄 수 있었습니다. 앞으로 이 글귀를 거울삼아 현실에 안주 하지 않고 끊임없이 새로운것에 도전하여 변화하는 사람이 될수 있었으면 좋겠습니다.

