



## 공학석사 학위논문

# 하이브리드 수중 글라이더 설계 및 모형실험을 통한 실해역 성능추정

A Design for Hybrid Underwater Glider and The Estimation of Field Performance Using Model Test



한국해양대학교 대학원

기계공학과 강현승

# 본 논문을 강현승의 공학석사 학위논문으로 인준함.





# 한국해양대학교 대학원



목 차

List of Tables	 V
List of Figures	 vi
Abstract	 vi

 1. 서 론
 1.1 연구배경 및 목적
 1

 1.2 하이브리드 수중 글라이더 개념설계
 2

 2. 하이브리드 수중 글라이더 모델링
 6

 2.1 좌표계 및 정상상태 모델링
 6

 2.2 내부장치 구성
 8

## 3. 선체 설계 및 해석

3.1	선체 설계			10
	3.1.1 선형	설계		10
	3.1.2 선체	저항 해석		11
	3.1.3 최대	속도 추정		13
	3.1.4 선체	구조		18
3.2	부력제어기	설계		21
	3.2.1 부력	제어기 구등	동 메커니즘	21
	3.2.2 부력	제어기 용려	걍 해석	23



3.2.3 부력제어기 소비전력	24
3.2.4 부력제어기 구조 설계	26
3.3 자세제어기 설계	27
3.3.1 자세제어기 구동 메커니즘	27
3.3.2 자세제어기 용량 해석	27
3.3.3 자세제어기 구조 설계	29
3.4 추진기 설계	31
3.4.1 추진 성능 해석	31
3.4.2 추진기 구조 설계	32
3.4.3 추진기 성능시험	32
3.5 고정익 설계	34
3.6 방향타 설계	34
3.7 구성 종합	35

# 4. 구동 성능 시험

. 구동 성능 시험	1945 (S)	
4.1 자항속도 측정	OF LIN	39
4.2 조종 성능 시험		40
4.3 수중 자세 유지	시험	41

# 5. 동역학 시뮬레이션

5.1 유체력 계수 추정	42
5.1.1 좌표계 및 외력성분 정의	42
5.1.2 유체정역학적 작용력	44
5.1.3 점성감쇠유체력	45
5.1.4 관성유체력	46
5.1.5 제어유체력	48



5.1.6 유체력 종합	50
5.2 시뮬레이션	51
5.2.1 활강각에 따른 최고속도 및 구간거리	53
5.2.2 부력제어량에 따른 최고속도 및 소모전력량	55
6. 결론	

참고문헌	참고문헌	문헌	59
------	------	----	----





# List of Tables

Table 1 Existing underwater gliders	2
Table 2 Existing hybrid underwater gliders	3
Table 3 Myring parameters for HUG	11
Table 4 Reference for AoA CFD	15
Table 5 Material property of hull	19
Table 6 Von mises stress	20
Table 7 A factor an modes	21
Table 8 Specification of hull	21
Table 9 Specification of motor for buoyancy engine	25
Table 10 Result of FEM analysis	27
Table 11 Specification of buoyancy engine	27
Table 12 Specification of attitude controller	31
Table 13 Specification of thruster	
Table 14 Specification of fixed wing	
Table 15 Specification of rudder	35
Table 16 Dimensions of HUG	
Table 17 Origin parameter of HUG	39
Table 18 Moment of Inertia	39
Table 19 Drag Coefficients	47
Table 20 Added Mass Coefficients	49
Table 21 Control Force Coefficients	51
Table 22 Velocity and cycle distance by glide angle	54
Table 23 Velocity and power by Buoyancy variation	58



# List of Figures

Fig.	1 ไ	Underwater gldiers ·····	1
Fig.	2 5	Scenario of hybrid glide(from launch)	4
Fig.	3 5	Scenario of hybrid glide (until take off)	4
Fig.	4]	Frame assignment ·····	6
Fig.	5 (	Component of acting force	7
Fig.	6 (	Glider mass definitions	8
Fig.	7 (	Components of Glider	9
Fig.	8 ]	Myring parameters model	10
Fig.	9 ]	Profile at myring equation	11
Fig.	10	Velocity distribution	12
Fig.	11	Pressure at model	12
Fig.	12	Drag force vs. speed ······	13
Fig.	13	Action of lift and drag force	13
Fig.	14	Contour of velocity	14
Fig.	15	Calculation lift and drag	15
Fig.	16	Equilibrium glides using lift and drag	16
Fig.	17	Glide design speed vs. path angle	16
Fig.	18	$\cos\xi \sin^{1/2}\xi$ vs. path angle	17
Fig.	19	Maximum velocity vs. volume	17
Fig.	20	Maximum velocity vs. ballast weight	18
Fig.	21	Hull structure and mesh	19
Fig.	22	Von mises stress	19
Fig.	23	Buckling analysis	20



Fig.	24	Concept of buoyancy engine	22
Fig.	25	Component of buoyancy engine	22
Fig.	26	Piston position vs. CoB Variation	24
Fig.	27	Piston position vs. pitch angle	24
Fig.	28	Discharge power ·····	25
Fig.	29	Buoyacy engine assembly	27
Fig.	30	Myring parameters model	28
Fig.	31	Mass position vs. CoG variation	29
Fig.	32	Mass position vs. pitch angle	29
Fig.	33	Design of attitude controller	30
Fig.	34	Attitude controller assembly	30
Fig.	35	Estimated drag force	31
Fig.	36	Design of underwater thruster	32
Fig.	37	Underwater thruster assembly	32
Fig.	38	Measure bollard force of thruster	33
Fig.	39	Thrust force vs. RPM	33
Fig.	40	Cross section of HUG	36
Fig.	41	Exploded view of front hull assembly	36
Fig.	42	Exploded view of rear hull assembly	37
Fig.	43	Exploded view of payload section	37
Fig.	44	Exterior dimension of HUG	38
Fig.	45	Self-propulsion speed test	40
Fig.	<b>46</b>	Speed using thruster	41
Fig.	47	Maneuvering test	41
Fig.	<b>48</b>	Maneuvering using rudder	42
Fig.	49	Actuators calibration in water tank	42
Fig.	50	Coordinate frame on underwater glider	44



Fig.	51	Hybrid Underwater Glider Simulator	53
Fig.	52	X-Z Plane Trajectory of Underwater Glider	54
Fig.	53	Simulation by glide angle	55
Fig.	54	AoA vs. Glide path angle	56
Fig.	55	Velocity vs. Buoyancy variation	57





# A Design for Hybrid Underwater Glider and The Estimation of Field Performance Using Model Test

Kang, Hyeon Seung

Department of Mechanical Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

# Abstract

The hybrid underwater glider (HUG) is an improved version of autonomous underwater glider which glide under the water by controlling their buoyancy and additional thruster. By the aid of the thruster, the maneuverability and performance of reaching to a target area can be improved.

In this thesis, the structure of the HUG is designed through analyses on the hydrodynamics of the ship and empirical formula for the ship design. The ship hull design of the HUG was performed, using this, the drag of the HUG was analysed. The structure and capacity of the buoyancy engine were designed through the analysis on the HUG. Also, a mass transfer system was designed for attitude control of the HUG. And an hull pressure analysis was performed for 200m depth operation of the HUG using FEM analysis. Also, computer simulations on the hydrodynamics of the HUG were performed through estimation of the hydrodynamic coefficients.

To test the performance of the actuator and to get hull coefficients, water tank tests were performed using the developed HUG. The results of the performance tests are presented and its results are discussed.

**KEY WORDS:** Hybrid underwater glider 하이브리드 수중글라이더; Unmanned underwater vehicle 무인 수중 운동체; Dynamic modeling 동역학모델링; Pressure-resistant analysis 내압해석; Hydrostatic coefficient 유체정역학 계수;



# 제 1 장 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

Collection

수중 글라이더(underwater Glider)는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)의 일종으로 내 부의 구동기로 부력과 자세를 제어하여 수중에서 운동하며 목표해역의 자료 수집등과 같은 미션 수행이 가능한 플랫폼의 형태이다. 글라이딩 모션으로 위치 에너지를 활용하는 수중운 동체는 적은 운영비용과 장기간의 탐사 가능성을 장점으로 해양의 정보를 수집하는데 매우 유용하다. 근래의 수중글라이더는 1989년 해양학(Oceanography) 학술잡지에 그 개념이 소개 (Stommel, 1989)되었고, 2000년대 들어 상용 수중 글라이더들이 실제해역에서 실험되고 사용 되는 사례가 보고되었다(Curtin, T.B., et al., 2005). 2000년대 중반에 들어 Woods Hole 해양 연구소와 스크립스 해양연구소가 공동 개발한 "Spray" 글라이더(a)를 시작으로 Webb Research Corperation의 "Slocum glider" (b), 워싱턴 대학에서 개발한 "Seaglider" (c)를 시 작으로 상용 수중 글라이더들이 개발되고 그 성능에 대해 실험한 결과들이 있다. 최근 2014 년 ACSA-ALCEN 의 "Seaexplorer" (d)가 재충전이 가능한 배터리를 적용하여 60일 동안 1100km이상의 운용 성능을 실험하였다. 이러한 플랫폼들의 개발과 해양 관측 및 그 정보수 집의 중요성도 동시에 대두됨에 따라 그 활용성은 더욱 증가하고 있다.



Fig. 1 Underwater Gliders

아래 Table1에 현재 상용의 수중 글라이더들에 대한 사양을 정리하였다. 소형의 글라이더 들은 전장 1.5~2.0m, 배수량 50kg의 소형이 주류를 이루고 있다. 항해수심은 200m에서 1500m로 다양하다. 속도는 최대 1knots(0.5m/s)이나 순항 속도는 0.5knots(0.25m/s)이다. 수중 글라이더의 최대 장점인 운용기간은 수천 km에 다다른다.

Glider	Hull Dimension	Volume Change	Operating	Endurance
Slocum	$115 \times D0.21$ 52kg	Max 520cc	Max. 20bar	0.25 m/s
(Battery)	L1.0×D0.21, 02.kg	Max 020cc	Max. 0.4m/s	2300km
Spray	L2.0×D0.20_51kg	Max 900cc	Max. 150bar	0.25 m/s
opruy	L2.0 ~ D0.20, JINg	Max 900cc	Max. 0.45m/s	7000km
Seaglider	L1.8×D0.30_52kg	Max 840cc	Max. 100bar	0.25 m/s
ocugnuor	L1.0 × D0.00, 02Mg	Mux 01000	Max. 0.4m/s	4500km
Slocum	$L1.5 \times D0.21$ 52kg	Max 400cc	Max. 120bar	0.25 m/s
(Thermal)		Mux 400cc	Max. 0.27m/s	30000km
Seaexplorer	$12.0 \times D0.25$ 59kg	Max 1000cc	Max. 70bar	1200km
	LL.0 / D0.20, 00Kg	Max 1000cc	Max. 0.5m/s	(Rechargeable)

Table 1 Existing Underwater Gliders

수중 글라이더는 부력변화에 따라 중력방향으로 작용하는 힘을 이용하여 주항하므로, 톱 니형태(Sawtooth Pattern)의 항적을 보인다. 목표 해역을 통과하며 수집하고자 하는 물리 적·화학적·생물학적 정보에 따라 해당 센서를 장착하고 바다의 표층과 심층사이의 수직적 인 정보를 수집하게 된다. 매 주기마다 잠항하는 공간에 대해 정보를 입체적으로 자료화 할 수 있다. 하지만 강인성이 부족한 추진방식의 단점으로 목표지점에 도달하기 위해 해류의 흐름이나 수면의 바람과 같은 외력에 대한 대응책이 필요하다.

본 논문에서는 좀 더 진보된 요구사항과 능동적인 자료 수집을 위해 기존의 수중 글라이 더에 부가적으로 내장 에너지의 일부분을 외부의 추진기에 사용하는 자항방식 (Self-Propulsion type)을 적용하였다. 이러한 하이브리드 수중 글라이더(Hybrid Underwater Glider, HUG)는 외력에 대응해서 해역 통과성능과 목표지점 도달 신뢰성을 향상시키고, 부 력엔진의 최적 배치를 고안하여 수중에서의 설정된 목표 수심 유지를 통해 해저면 스캔 (Sub-bottom Scan) 등에 활용할 수 있도록 하였다.

상기의 운용 목적에 따라 HUG의 기본개념 설정하고 동역학 모델링과 실제 모델의 장치 를 설계한 후 제작하여 그 운동성능을 검증하는 것을 목표로 한다.

#### 1.2 하이브리드 수중 글라이더 개념설계

Collection

앞에서 소개한 전통적인 수중글라이더들은 내부의 부력제어기와 자세제어기를 이용한 운 항속도에 수동적인 운동성능을 보여준다. 예측할 수 없는 해양환경과 능동적인 조종성능을 확보하기 위하여 외부에 추진기를 장착한 복합추진(Hybrid-driven)방식의 글라이더들이 등장 하였다. Teledyne社의 "Slocum G2" 글라이더는 Slocum 글라이더의 개량형 모델로 선체 후방에 접이식 프로펠러를 부착하였다. 천진대학교의 "Haiyan"글라이더의 경우 상용의 수 중추진기를 선체 후방에 부착하였다. 복합추진 방식의 글라이더는 상기의 장점이 있는 반 면, 추진기 사용에 따라 속도는 증가하지만 운용기간은 감소하므로 다양한 환경에 따른 적 용 방법에 대한 알고리즘과 전략이 필요하다.

	Slocum G2	Haiyan
Exterior		
Dimension	L1.5×D0.22, 54kg	L1.8×D0.30, 70kg
Operating Depth	30~1000m	1500m
Endurance	600~1500km, 25~365days	1000km, 30days
Manufacturer	Teledyne Webb Research	Tianjin Univercity

#### Table 2 Existing Hybrid Underwater Gliders

HUG의 실제 형상설계에 앞서 본 글라이더가 활용될 체계와 사용 환경에 따라서 최적의 성능을 구현할 수 있도록 그 형상과 세부 치수를 설정하여야 한다. 접근성이 좋지 않은 수 중의 환경에서 수중로봇은 플랫폼의 역할로써 매니퓰레이터나 다양한 센서를 장착하기 위해 개방형선체 구조를 고려할 수 있으나, 수중 글라이더의 경우 에너지 절감을 위해 유체의 저 항을 최소로 하는 형상을 지향한다. 최종의 운용목적에 부합할 수 있도록 정보수집용 센서 의 설치를 고려하고 필요에 따라 교체할 수 있도록 설계하였다. 이를 위해 기존의 글라이더 들에 적용되었던 부력제어방식을 고찰하고 개선점을 도출하고자 한다. 높은 수압에 대응하 기 위하여 유압을 이용한 피스톤-실린더 방식이나 부레(Bladder)방식을 적용하였을 때는 펌 프의 구동 소음과 부가장비에 따른 하중 증가 등의 문제점이 발생할 수 있다. 이에 모터 구 동타입의 스트로크 리니어모션 시스템을 적용한 부력제어기가 적합하다.

본 HUG는 200m 수심의 환경에서 운용을 목표로 성능 지표를 정하였다. HUG의 주요 운용 시나리오는 Fig. 2에 나타내었다. 수면에서 부력제어를 통해 수중으로 활강을 시작하여

- 3 -



목표수심과 수면 사이를 왕복하여 운항하게 된다. HUG가 수중에서 활강하기 위해서는 자체 적으로 음성부력을 만들고 무게중심은 앞으로 이동시켜서 최적 활강 각을 이루게 하여야 한 다. 반대로 상향 활강하기 위해서는 양성부력으로 만들고 무게중심은 뒤로 이동시켜야 한 다. 이러한 움직임 동안에도 원하는 침로를 유지하기 위해서 방향타를 사용해서 타력을 발 생시켜야 한다. 목표해역 접근성 향상과 강한 조류를 극복하기 위해서는 추진기를 작동 시 키게 된다.



Fig. 2 Scenario of Hybrid Glide (from launch)

임무구역을 횡단하거나 목표로 하는 일정 구역을 스캔하고 회수까지의 궤적은 Fig.3와 같 다. 일정 주기로 부상하여 항로 수정과 추가적인 임무를 부여받을 수 있다.



Fig. 3 Scenario of Hybrid Glide (until take off)



앞에서 서술한 수중글라이더의 운영 시나리오와 동작방법에 따라 설계에 요구되는 사항은 다음과 같다.

- 수중 운동시에 저항을 최소화 할 수 있는 외형 설계
- 수중 환경에 따른 방수 및 내압 구조
- 부력을 제어할 수 있는 모터 스트로크 타입의 밸러스트(Ballast) 장치
- 자세 제어를 위한 내부 질량 이동 장치
- 필요에 따라 구동되는 외부 추진기
- 목표지점 도달을 위한 조향 시스템
- 해역 정보 수집을 위한 센서 탑재 구조





## 제 2 장 HUG 모델링

#### 2.1 좌표계 및 정상상태 모델링

Collection

HUG의 내부 구동장치 작동에 따른 선체의 외적 거동을 파악하기 위해 수학적 동역학 모 델이 필요하다. 이를 위해 Fig.4와 같이 좌표계를 설정하였다. HUG를 강체(Rigid Body)로 가 정하고 공간상에서 그 운동을 고려하기 위해 좌표계를 설정하였다. 기준이 되는 지구 고정 좌표계  $E - X_E Y_E Z_E$ 는 NED(North East Down) 좌표계를 사용하였고, 글라이더의 고정좌표 계는 강체 내부의 부력중심을 기준으로 하여  $Q - x_o y_o z_o$ 을 설정하였다.



Fig. 4 Frame assignment

HUG의 운동은 자체 무게에 따른 중력, 수중에서 작용하는 부력, 움직임에 따른 항력과 양력, 추진기의 추력으로 나타낼 수 있다. 이 힘 성분들을 Fig.5와 같이 표시 할 수 있다. 중 력(F<sub>W</sub>)은 선체의 질량에 대해 작용하는 힘이다. 글라이더를 강체로 가정하였을 때 분포되어 있는 질량들이 한 지점(CG)에 모여 있다고 가정할 때, 그 지점에서 중력이 작용한다고 볼 수 있다. 부력(F<sub>B</sub>)은 유체에 잠긴 체적 만큼에 작용하는 압력에 의해 중력과 반대반향으로 작용하는 힘이다. 부력도 모든 체적에 대한 성분을 한 지점(CB)에 모여 있다고 가정하고 그 작용을 관찰 할 수 있다. 항력(F<sub>D</sub>)은 유체 내에서 표면적을 가진 물체가 운동할 때 운동방 향과 반대로 작용하는 힘이다. 양력(F<sub>L</sub>)은 유체 내에서 받음각을 가지고 운동하는 물체에 작용하는 힘으로, 동체의 형상에 대한 양력과 추가적인 양력을 발생시키기 위해 날개를 부 착하였다. 이러한 양력 성분은 날개의 평면부와 직교하는 방향으로 작용한다. 양력과 항력 은 물체의 단면적과 속도의 제곱에 비례하여 영향을 받는다. 각각의 힘을 서술하면 식(1)~식 (4)와 같으며 이 힘들의 합에 의해 글라이더가 병진운동에 대한 평형상태를 유지할 수 있다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \tag{1}$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A \tag{2}$$

$$F_B = \rho V_{disp} g \tag{3}$$

(4)

$$F_W = mg$$

Collection



Fig. 5 Component of Acting Force

활강 중인 글라이더의 자세 평형과 안정속도(Steady Speed)를 추정하기 위해 Fig.6과 같이 내부 질량의 이동으로 모멘트 성분을 정의하고 식(5)~식(9)으로 나타낼 수 있다. 본 연구의 글라이더에서도 부력제어와 내부이동질량을 가지므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.(N. E. Leonard and J. G. Graver, 2001)



Fig. 6 Glider mass definitions

$$\dot{x} = v_1 \cos\theta + v_3 \sin\theta \tag{5}$$

 $\dot{z} = -v_1 \sin\theta + v_3 \cos\theta \tag{6}$ 

$$0 = (m_{f3} - m_{f1})v_{1_{eq}}v_{3_{eq}} - \overline{m}g(r_{p1_{eq}}\cos\theta_{eq} + r_{p3_{eq}}\sin\theta_{eq}) - m_{b_{eq}}g(r_{b1}\cos\theta_{eq} + r_{b3}\sin\theta_{eq}) - m_{w}g(r_{w1}\cos\theta_{eq} + r_{w3}\sin\theta_{eq}) + M_{DL_{eq}}$$
(7)

$$0 = L_{eq} \sin \alpha_{eq} - D_{eq} \cos \alpha_{eq} - m_{0eq} g \sin \theta_{eq}$$
(8)

$$0 = L_{eq} \cos \alpha_{eq} + D_{eq} \sin \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \cos \theta_{eq}$$
(9)

 $(v_1,v_3:$  Velocity in the  $e_1$  and  $e_3$  directions,  $\theta$ : Pitch Angle,  $\alpha$ : Angle of attack,  $m_{f1}$ ,  $m_{f3}:$  added mass)

### 2.2 내부장치 구성

ollection

각 구획에 배치된 구성품은 아래 Fig.7과 같다. 부력제어기①, 자세제어기②, 배터리③, 컨 트롤보드④, 추진기⑤, 방향타⑥, 외부센서⑦, gps/communication용 안테나⑧, 수심계⑨등으 로 구성되어 있으며, 각 구성품은 원기둥의 중공 형태의 선체에 내장되도록 하였다. 기존의 일체형 선체와는 다르게 본체를 노즈콘⑩, 전방선체부⑪, 적재하중(payload)부⑫, 후방선체부 ⑬, 테일콘(카울링)⑭의 5부분으로 나누었다. 개념설계단계에서 각각의 구성품 간에 상호 작 용과 배선을 위한 배치를 고려하였다. 수중의 환경 및 필요로 하는 데이터를 수집하기 위한 센서모듈 적재를 위한 공간은 중심부에 위치하여, 해당 장비 교체나 센서의 변경에 글라이 더 자체의 형상변화를 최소화 할 수 있도록 하였다. 부력제어기의 외부유체가 유입되는 실 린더 파트를 페이로드 부근의 개방부로 향하게 하여, 부력 조절에 따른 무게중심과 부력중 심 변화량을 최소로 하였다. 자세제어기도 전방의 실린더 헐에 내장하여 공간을 활용하였 다. 후방 헐에는 메인 컨트롤보드와 배터리를 내장하여 전방 헐의 모터와 추진기의 방사노 이즈로부터 차폐시키는 효과를 얻을 수 있었다.





# 제 3 장 선체 설계 및 해석

## 3.1 선체 설계

### 3.1.1 선형 설계

HUG의 외형 설계는 Myring hull profile equations(D.F.Myring,1976)의 자료에 기초를 두고 설계하였다. 이 식은 선체의 길이와 직경에 따라서 외부의 유체로부터 저항을 최소로 할 수 있는 외형을 만들 수 있는 경험식이다. 식(10)과 식(11)을 이용하여 선수부와 선미부의 프로 파일을 설계하였다.

$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d\left[1 - \left(\frac{\Xi + a_{offset} - a}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{n}}$$
(10)

$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan\theta}{c}\right](\Xi - l)^2 + \left[\frac{d}{c^2} - \frac{\tan\theta}{c^2}\right](\Xi - l_f)^3$$
(11)

설계에 사용한 파라미터는 Fig.8에 나타내었다.



Fig. 8 Myring parameters model

선체의 형상을 결정하는 각 요목은 Table3과 같으며, 파라미터를 조정하여 적합한 형상으 로 설계할 수 있다.





Parameters	Description	Units
a	Nose section length	m
$a_{offset}$	Nose offset	m
b	Constant-radius center section length	m
c	Tail section length	m
$c_{offset}$	Tail offset	m
n	Exponential coefficient	n/a
heta	Included tail angle	radians
d	Maximum hull diameter	m
$l_f$	Vehicle froward length	m
<i>l</i>	Vehicle total length	m

Table 3 Myring Parameters for HUG

중앙 평행부의 길이와 선수·선미부의 내부 공간 활용을 위한 형상으로 아래의 Fig.9와 같이 프로파일을 생성하였다.

ſ	150	_				1			7			1		4								
	100						-							- 4						~~	~	
	50	1				-			-							2	-					
	0	, ,	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	12	00	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900

Fig. 9 Profile at myring equation

1945

#### 3.1.2 선체 저항 해석

수중에서 운동하는 물체의 저항은 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 예측할 수 있다. 상대적으로 저비용 단시간의 투자로 유사결과를 도출 할 수 있기 때문에 초기 설 계단계에서 유용하게 활용할 수 있다. 최근에는 해석기법 발달과 프로세서 성능 향상으로 정확성 및 계산시간 또한 단축되는 추세이다. 최종의 실물에 대한 결과는 실험을 통해 검증 하고 신뢰성을 확보할 수 있다.

저항 해석을 위해 프로파일 추정 경험식에 의한 형상을 구현하고 실제의 모델 크기로 생 성하였다. 계산에 사용된 글라이더는 타원형의 선수·선미 형상에 25도의 후퇴각(Sweep Angle)을 가지는 날개를 부착한 원통형이다. 원통형과 평판의 날개가 복합적으로 구성되어 있어서 전통적인 형상의 양항력 수치보다 실제 형상에 근접한 모델의 수치를 고려할 필요가 있다.

해석은 ANSYS WORKBENCH의 CFX를 사용하였으며, SST k-omega 난류 모델을 적용하였

- 11 -



다. 유속은 0.5knots부터 3knots까지 속도를 증가시키며 해석하였다. 오브젝트 주변의 유속분 포는 아래 Fig.10과 같고, 노즈 부분과 추진기 쪽의 곡률 부분에서 유속이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 해석결과를 바탕으로 후미의 안테나를 수직 안정핀 형태로 하였고, 대칭인 형 상으로 러더를 선체 하부에 설치하였다.



모델의 길이방향에 따른 압력분포는 아래 Fig.11과 같이 나타났다. 후방 부분에 압력이 고 르지 못한 것은 선체의 표면 마찰과 선체의 중심부에 있는 날개로부터 발생하는 와류 (Vortex)와 추진기 설치에 따라 기구부적으로 곡률이 완만하지 못하기 때문인 것으로 추정 된다. 추가적인 부가 돌출물로 인한 저항 증가를 막기 위해 이들의 형상은 유선형 혹은 익 형으로 설계 및 설치하였다.



Fig. 11 Pressure at model



해석을 통해 얻어진 속도별 유체항력은 아래 Fig.12에 나타내었다. 속도에 따라 저항이 비 선형적으로 증가함을 볼 수 있고, 얻어진 항력 결과에 따라 계산된 평균 항력계수는 0.28이 다. 어뢰형 선체를 가진 AUV(Prestero, 2001)의 항력계수가 0.3정도임을 고려할 때 외부 돌 출 부가물이 없는 최적화된 선체 형상의 항력계수로 적용가능하다.



## 3.1.3 최대 속도 추정

활강중인 글라이더의 받음각에 의해 발생하는 양·항력의 비율은 글라이더의 전후경사 안 정에 영향을 준다. Fig.13과 같이 받음각이 변화하면 그에 따른 양력과 항력의 합력이 변화 하고 이와 평형을 이루기 위해 글라이더의 자세를 수정해야 한다. 이러한 상호작용에 의한 안정적인 상태를 가정하고 글라이더의 활강속도를 추정해볼 수 있다.



Fig. 13 Action of lift and drag force



먼저 수중에서 운동하는 글라이더의 저항치를 얻기 위해 다음과 같은 형상에 대해 CFD해 석을 수행하였다. 활강에 따른 받음각(Angle of Attack)을 0°~10°까지 적용하였을 때 발생 하는 양력과 항력을 계산하였다. 아래의 Fig.14는 받음각에 따른 글라이더 주변의 유속 분포 를 보여준다.



Fig. 14 Contour of velocity

계산에 사용된 참조 값은 Table4와 같다.

Table 4	Reference	for	AoA	CFD
---------	-----------	-----	-----	-----

Index	Value	Units
Density	1024	$kg/m^3$
Refrence Area	0.4905	$m^2$
Velocity	0.5144	m/s
Attack of Angle	0 ~ 10	deg



해석 결과에 따라 Fig.15에 받음각에 따른 양력과 항력의 계수를 정리하였다. 차트에서 보 이는 바와 같이 0°~10°의 받음각을 고려했을 때 항력의 증가보다는 양력의 증가가 두드러 짐을 알 수 있다. 글라이더의 활강시에 진행방향과 선체간에 이루는 각도를 고려하였을 때 양항비가 최적이 되는 부분을 고려하여 성능 최적화에 도입하였다.



Fig. 15 Calculation Lift and Drag

글라이더의 활장 각도(Path Angle)는 양력과 항력의 비에 따라 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_{eq} = -\tan^{-1} \left( \frac{D_{eq}}{L_{eq}} \right)$$

계산된 계수에 따른 받음각과 활강 각을 연계하여 나타내면 Fig. 16과 같다.



Fig. 16 Equilibrium glieds using Lift and Drag

밸러스트 최대 제어량과 활장각에 따라 글라이더의 속도(Graver. 2005)는 식(13)~식(15)로 나타낼 수 있다.



(12)

$$V_{path} = \left(\frac{m_0 g \sin \xi}{\frac{1}{2}\rho C_D(\xi(\alpha))}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(13)

$$V_z = \left(\frac{m_0 g \sin \xi}{\frac{1}{2}\rho C_D(\xi(\alpha))}\right)^2 \sin \xi \tag{14}$$

$$V_x = \left(\frac{m_0 g \sin \xi}{\frac{1}{2}\rho C_D(\xi(\alpha))}\right)^{\frac{1}{2}} \cos \xi \tag{15}$$

계산 결과는 Fig. 17과 같다.



Fig. 17 Glide design speed vs, Path Angle

식(13)에서 수평이동속도( $V_x$ )가 최대가 되는 각도는  $\cos\xi \sin^{1/2}\xi$ 가 최대가 되는 지점이다. Fig. 18에서 나타나듯이 활강각 35도 부근에서 0.62으로 최대가 된다.



Fig. 18  $\cos\xi \sin^{1/2}\xi$  vs. Path angle

- 16 -



글라이더의 최대속도를 밸러스트 제어량에 따라 나타내면 다음의 식(16)과 같다.

$$V_{x} = \left(\frac{m_{0}g}{\frac{1}{2}\rho C_{D}(\xi(\alpha))}\right)^{\frac{1}{2}} \times 0.62$$
(16)

전체 배수량과 최대 밸러스트 제어비 $(n_b = \frac{m_0}{\rho V})$ 에 따른 속도를 Fig. 19에 나타내었다.



Fig. 19 Max. Velocity vs. Volume

이때, 본 논문에서 설계하고자 하는 배수량 50kgf의 소형 수중글라이더를 기준으로 목표 속도를 1.5knots로 할 때 밸러스트 제어비는 0.009이며 제어량은 0.45kgf이 된다. 최대 밸러 스트 제어량에 대한 최대 속도는 다음의 Fig.20과 같다.



Fig. 20 Max Velocity vs. Ballast Weight

수중글라이더의 주 추진에너지는 부력제어기에서 만들어지며 대부분의 에너지를 부력제어 기의 스트로크 제어에 사용된다고 볼 수 있다. 따라서 최대속도를 목표로 목표항해 거리와 배터리의 잔류전력을 고려하여 연동하게 된다.

Collection

#### 3.1.4 선체 구조

중앙 평행부의 선체는 3구간으로 나누었다. 그 중 전방부와 후방부의 헐은 수밀이 되는 내압 실린더 형태이다. 내부의 공간에 보강재를 추가 설치하지 않고 외부에 목표수심 200m 의 압력이 가해질 때 그 변형을 계산하였다. 해석에 사용된 실린더의 형태는 Fig.21(a)과 같 은 원형의 중공 실린더이며 압력은 모든 방향에서 물체 방향으로 작용한다.

수압에 따라 원주방향의 응력이 발생하므로 선체의 재질과 형상의 허용응력이 이보다 커 야 한다. 원주응력은 식(17)과 같이 정리된다.

$$\sigma = \frac{Pd}{2t} \tag{17}$$

( $\sigma$ :hoop stress *P*:pressure, *d*:diameter, *t*:thickness)

위 식에서 목표수심의 압력과 선체의 직경을 고려하였을 때 두께는 1.51mm라는 결과를 가진다. 3배 이상의 안전율과 가공 용이성을 고려하였을 때 5mm로 선체 두께를 선정하고 모델링을 하였다.

해석은 Solidworks Simulation으로 해석하였으며, 사용된 솔버는 FFEplus이다. 목표수심 200m에서의 압력인 2MPa을 전방위에서 작용시켰다.



Fig. 21 Hull structure and mesh

내압 실린더의 재질은 알루미늄 합금 중 6061에 T6열처리 상태이며, 세부 물성치는 Table 5와 같다.



Index	Value	Units
Material	6061-T6	n/a
Yield Stress	2.75e+008	N/m^2
Tensile Stress	3.1e+008	N/m^2
Poisson's Ratio	0.33	n/a
Density	2700	kg/m^3

Table 5 Material property of Hull

목표수심 정압력 해석 결과는 다음과 같다. 진공으로 조립되는 방식에 따라 내부 압력은 무시하고 외부의 수압을 적용하였다. Von mises 응력 결과는 다음의 Fig. 22와 같다. 가장 계수가 낮은 취약점으로 실린더 캡의 중심부에서 나타났으며, 캡의 모서리부분은 곡률을 주 어 응력집중을 최소화하였다.



Table 6 Von Mises Stress

Index	Value	Units
Max.	1.51957e+008	N/m^2
min.	1.95987e+006	N/m^2

좌굴모드는 6차까지 계산하였고 최초 좌굴인 모드1은 12.44Mpa에서 발생하였다.





Fig. 23 Buckling Analysis

각 모드별 압력계수는 아래의 Table 7과 같다. 최초 좌굴 수심을 1200m로 가정 할 수 있으며, 선체의 경량화와 구조 개선을 통해 두께를 조절 할 수 있겠으나, 실제 가공성을 고려 하였을 때 6T의 선체 두께를 선정하였다. 좌굴 해석의 결과로 이전의 선체에 대한 내압 성 능 연구 결과(하지훈, 2015)와 비교하여 같은 두께의 선체에서 직경과 길이에 대해 각각 1.1 배와 0.42배인 본 선체에서 좌굴대응 성능은 2배 이상임을 확인하였다.

Table	7	А	factor	at	Mode
Table	7	А	factor	at	Mode

Mode	factor
1	6.2216
2	6.2478
3	9.6882
4	9.6947
5	11.312
6	11.315

설계된 선체의 제원은 아래의 Table 8과 같다.



Index	Value	Units
Length	1.94	m
Diameter	0.22	m
Desired Depth	200	m
Drag Coefficiency	0.28	n/a
Nose/Tail Profile	Myiring profile eq.	n/a

Table 8 Specification of Hull

### 3.2 부력제어기 설계

## 3.2.1 부력제어기 구동 메커니즘

HUG가 수중에서 상·하향 활강할 수 있는 에너지는 중력과 부력의 차이로 발생시킨다. 일정한 체적을 유지한 부력상태에서는 임의의 질량체를 추가하여 중력의 영향을 크게 만들 어서 가라앉을 수 있고, 해당 질량을 제거하였을 때는 상대적인 부력의 증가로 다시 수면으 로 떠오를 수 있게 된다. 반복적인 활강을 필요로 하는 글라이더의 경우에는 일정한 중력이 작용하는 상태에서 부력을 조절 할 수 있는 구동기가 필요하다.

아래의 Fig.24은 고안된 부력제어기의 배치와 외부 유체와의 작용을 나타내고 있다. 글라 이더가 하향 활장시에는 중력보다 상대적으로 부력을 감소시키는데 이때 외부와 격리되어 있는 헐(Hull) 내부 공간에 있는 유체(공기)는 압축되어진다. 반대로 상향 활장시에는 중력보 다 부력을 증가시키기 위해 글라이더의 체적을 점유하던 유체(해수)를 배출하고 밀도가 낮 은 기체로 대신하게 된다.



Fig. 24 Concept of Buoyancy Engine

글라이더의 부력을 제어할 수 있는 방식에는 유압을 이용한 부레(Bladder)방식과 피스톤으 로 내부 체적을 확보하는 실린더방식이 있다. 본 글라이더에서는 실린더방식을 채택하였고,



피스톤 작동에는 볼스크류를 사용한 리니어모션 시스템을 적용하여 정밀한 부력제어가 가능 하도록 하였다. 아래 Fig.25은 부력제어기의 구성요소에 대한 것이다. 선체 외부와 통하는 위치에 유체가 드나들 수 있는 공간인 실린더를 배치하였고 그 유체를 밀어낼 수 있는 피스 톤이 내부에서 작동된다. 모터-감속기 파트는 볼스크류를 회전시켜서 피스톤에 연결된 샤프 트를 직선운동 시키게 된다. 피스톤의 실제 위치를 보정하기 위해 리미트 센서가 부착되어 있다.



Fig. 25 Component of Buoyancy Engine

글라이더의 속도는 부력제어기에서 유입·토출되는 유체의 체적에 따라 결정 된다. 연안 용 고속 글라이딩을 목표로 하여, 부력 제어량을 극대화하되 수중 환경에 기인한 기구부적 인 안정성과 그 구동시스템의 적절성을 동시에 고려하여야 한다.

#### 3.2.2 부력제어기 용량 해석

목표 운항 수심을 200m로 하였을 때, 해저의 수압은 2MPa이다. 이 수압을 극복하여 피스 톤이 작동 되고 부력을 증가시켜 글라이더가 상승할 수 있다. 부력제어기의 모터를 산정하 기 위해 먼저 피스톤에 가해지는 압력을 계산하면 식(18)과 같고,

$$F_P = P \times A \tag{18}$$

( $F_P$ :Force in piston, P:Pressure, A:Effective Area of piston)

리니어모션 시스템의 볼스크류를 구동시키기 위한 정격 토크는 아래의 식(19)처럼 구할 수 있다.



$$\tau = \frac{F_P \times l}{2\pi \eta n} \tag{19}$$

( $\tau$ :Torque, *l*:Lead of screw,  $\eta$ :efficiency, *n*:Reduction ratio)

피스톤의 이동속도는 식(20)과 같이 볼스크류의 리드와 감속비의 비로 나타낼 수 있다.

$$v_{piston} = \frac{r_M \times l}{60\,n} \tag{20}$$

( $v_{piston}$ :Speed of piston,  $r_M$ :RPM of Motor)

체적변화량에 따라 글라이더에는 회전하려는 모멘트가 발생하게 된다. 자체 추진기 사용 할 때에 수면과 평행한 상태를 유지하기 위해서 이 모멘트가 자세제어기로 보상 가능한 범 위에 있는지 다음의 계산으로 확인하였다. 부력제어량을 배제한 모멘트( $M_0$ )와 배수량( $V_0$ )에 부력제어량의 변화량( $\Delta V_{ballast}$ )과 그 모멘트 팔길이의 변화량( $\Delta l_{ballast}$ )을 고려하였다.

IF NUD DAL

$$CoB = \frac{M_0 + (\Delta V_{Ballast} + \Delta l_{Ballast})}{V_0 + \Delta V_{Ballast}}$$
(21)  
이때 글라이더의 피치( $\theta$ )각은 다음과 같다.  
$$\theta = \tan^{-1}(\frac{CoB}{z_{m_0}})$$
(22)

부력제어기의 피스톤 이동 가능량은 원점에서 ±75mm이며, 아래 Fig.26과 Fig.27은 이동 질량의 움직임에 따른 부력중심의 이동과 피치각의 정적 상태를 나타내고 있다.



Fig. 26 Piston Position vs. CoB Variation





Fig. 27 Piston Position vs. Pitch Angle

## 3.2.3 부력제어기 소비전력

Collection

수중글라이더에 내장된 전기에너지의 80%를 부력제어기에서 소비한다.[32] 따라서 수중글 라이더의 운용시간과 거리를 추정하기 위해서는 부력제어기의 소비전력을 계산할 필요가 있 다. Table 9는 부력제어기에 설치된 모터의 사양이다.

	i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	
Index	Value	Units
Norminal Voltage	36	V
Norminal Speed	5420	rpm
Norminal Torque	418	mNm
Norminal Current	QE 17.07	А
Torque Constant	60.4	mNm/A
Speed Constant	158	rpm/V
Speed/torque gradient	0.638	rpm/mNm

Table 9 Specification of Motor for Buoyancy Engine

목표수심인 200m의 작동환경을 기준으로 피스톤 작동면에 작용하는 힘은 12462N이므로, 구동토크에 관한 식(19)에 따라 필요 토크는 0.25Nm이다. 모터의 사양중 토크 상수에 비례 하여 소비전류는 4.15A임을 추정할 수 있다. 동시에 모터의 회전속도에 따라 토출 속도가 결정되므로, 피스톤의 이동속도에 관한 식(20)에 설계수치를 대입하여 아래와 같은 속도별 소비전압을 Fig. 28과 같이 산출할 수 있다.



Fig. 28 Discharge Power

부력제어기의 한 사이클 작동에 소요되는 시간과 전압으로 소모전력을 산정하여 보유 총 전 력량에 대해 구동 횟수 및 시간을 산정할 수 있다. 설계된 부력제어기의 200m 수심에서 토출 량은 초당 24cc이며, 전량 토출까지 37초가 소요된다. 이 때 소비전력은 78W이며, 소모전력 량은 0.8Wh(2880J)이다. 초기 설정된 시나리오에서 수면(10m로 가정)에 접근 시 다시 해수를 흡입할 때 소모 되는 전력은 4W이며 흡입 시간동안 소모전력량은 0.04Wh(145J)이다.

#### 3.2.4 부력제어기 구조 설계

Collection

위의 고려된 세목들에 따라 기구의 구조설계를 진행하였다. 피스톤을 작동시키는 축을 중 공으로 하여 내부에 리니어 액추에이터 시스템을 내장하여 공간 활용 및 무게를 경량화 시 켰다. 실린더와 피스톤은 수중에서 압력이 직접적으로 작용하는 구조물이다. 내압용기의 설 계기법에 따라 이들의 구조적 안정성을 판별해야하는 필요성이 있다. 선체 모델링 방식과 유사하게 고려하였을 때 실린더 내벽 두께는 1mm이하이지만 구동부분인 점과 가공성을 고 려하였을 때 안전율을 5배 이상으로 두어 5mm의 두께로 선정하였다.

Table 10에 실제 프로그램을 이용한 해석결과를 나타내었다. 실린더와 피스톤 재질은 AL6061이며, 피스톤 샤프트는 SUS304 재질을 적용하였다. 해석결과에 따르면 원형의 구조물 보다 길이방향으로 배치된 실린더 샤프트와 같은 구조에서 축방향 응력이 상대적으로 크게 발생함을 보였다. 변위량 중 실린더 중간부분의 원주 바깥 방향으로 0.063mm의 변위량은 수밀성과 관련되어 있으며, 씰링의 예압으로 대응 가능한 수치임을 알 수 있다. 내부 구조 에 작용하는 응력의 경우 최종 안전 계수는 3.06의 결과를 보였다.



Table 10 Result of FEM Analysis

Eig. 20 Duranen Engine Assemble

Fig. 29 Buoyancy Engine Assembly

부력제어기의 제원은 Table 11과 같다

Table 11 Specification of Buoyancy Engine

Index	Value	Units
Discharge Pressure	20.00	$kgf/cm^2$
Control Volume	0.95 ( $ ho = 1000 kg/m^3$ )	kgf
Driven Motor	DC Type	n/a



### 3.3 자세제어기 설계

#### 3.3.1 자세제어기 구동 메커니즘

글라이더는 내부의 일정 질량을 이동시켜서 자세를 제어할 수 있다. 부력제어만으로 글라 이더의 피치를 변화시켜 활강할 수 있지만, 최적의 활강 경로 조정과 수중에서의 자세 안정 화를 위해서는 추가적인 자유도를 제어할 구동기가 필요하게 된다. 본 글라이더는 내부의 이동 질량을 길이에 평행한 방향으로 움직이며 전체의 무게중심을 이동시킨다.

선체의 부력중심이 고정되어 있을 때, 이동질량을 후방으로 이동시키면 선체와 수평하고 길이방향에 직교한 축의 시계방향으로 회전하려는 모멘트가 발생하며, 반대로 이동질량을 전방으로 이동시키면 반시계방향으로 회전하려는 모멘트가 발생한다. 모멘트로 인해 선체의 경사가 시작되고 무게중심과 부력중심이 연직선상에 놓이면 경사된 상태를 유지하게 된다.



#### 3.3.2 자세제어기 용량 해석

리니어모션 시스템의 이송나사를 구동시키기 위한 정격 토크는 아래의 식(23)으로 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{W_m \times l}{2\pi \eta n} \tag{23}$$

( $\tau$ :Torque,  $W_m$ : movable weight, l:Lead,  $\eta$ :efficiency, n:Reduction ratio)

이동 질량의 속도는 이송나사의 리드와 감속비의 비로 나타낼 수 있다.

$$v_{mass} = \frac{r_M \times l}{60\,n} \tag{24}$$

 $(v_{mass}: \text{Speed of movable mass, } r_M: \text{RPM of Motor})$ 

- 27 -



모멘트법의 의해서 내부 이동질량의 움직임에 따라 전체 무게중심 변화량을 아래와 같이 알 수 있다.

$$CoG = \frac{M_0 + (\Delta m_{Movable} + \Delta l_{Movable})}{m_0 + \Delta m_{Movable}}$$
(25)

이때 글라이더의 피치( $\theta$ )각은 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{CoG}{z_{m_0}}\right) \tag{26}$$

고안된 자세제어기의 원점에서 이동 가능한 스트로크는 ±100mm이며, 이때 글라이더와 직교하는 지구중력방향으로의 질량중심 위치는 10mm이다. 아래 Fig.31과 Fig.32는 이동질량 의 움직임에 따른 질량중심의 이동과 피치각의 변화량을 나타내고 있다.



Fig. 31 Mass Position vs. CoG Variation



Fig. 32 Mass Position vs. Pitch Angle



## 3.3.3 자세제어기 구조 설계

위에서 계산된 항목들을 설계조건으로 자세제어기의 구조설계를 하였다. 자세제어기는 부 력제어기와의 같은 공간을 점유하므로, 효율적인 공간배치를 위해서 이동질량의 형상을 호 (Arc)형태로 하여 이동질량이 움직일 때 부력제어기와의 간섭이 없도록 하였다. 두 개의 봉 (Rod)을 따라 평행하게 사다리꼴나사샤프트를 배치하고 회전에 따라 무게추가 전후로 이동 하게 하였다.

설계된 자세제어기의 외관과 각부 명칭은 Fig.33과 같다.



Fig. 33 Design of Attitude Controller

제작된 자세제어기는 무게추 역할로 배터리를 이용하였고 원형 실린더의 공간을 최대 활용하도록 배치하였다.

실제 제작된 자세제어기 모듈은 Fig.34과 같다. 배터리는 40152 Lifepo4타입의 8셀을 조립 하였고, 셀당 무게가 480g으로 트레이와 부가적인 부품의 무게를 포함하여 약 4750g의 이동 질량이 된다.



Fig. 34 Attitude Controller Assembly

제작된 자세제어기의 제원은 Table 12과 같다. 이동질량이 움직이는 속력은 6mm/s로



100mm인 스트로크를 이동하는데 17sec가 소요된다. 선정된 모터를 이용하여 자세제어기가 수직상태의 최대 부하일 때도 구동이 가능함을 확인하였다.

Index	Value	Units
Movable Mass	4.75	kgf
Stroke	0.2	m
Moving Speed	0.006	m/s
Driven Motor	11W 24V DC Type	n/a

Table 12 Specification of Attitude Controller

## 3.4 추진기 설계

Collection

## 3.4.1 추진 성능 추정

복합추진 방식의 적용을 위해 수중에서 필요시 자체적인 추진이 가능하도록 선미부에 추 진기를 부착하였다. 추진기는 목표로 하는 속도에서의 선체의 저항을 극복하고 추력을 발생 시킬 수 있어야 한다. 선체자체의 저항 해석을 위해 CFD를 이용하여 계산된 결과값인 0.28 의 저항계수를 기반으로 외부 부가물에 의한 저항계수 증가를 고려하여 0.3의 저항계수를 설정하고 속도별 저항을 Fig.35에 나타내었다.



Fig. 35 Estimated Drag force

목표하는 추진속도를 3knots(1.5m/s)로 하였을 때 최대 항력은 12.8N이다. 설계하고자 하는 추진기의 추력도 이 저항에 상응해야 한다. 추진기의 구동시간과 기구부적 수명을 고려하였 을 때 2배의 출력을 가정하게 된다.

#### 3.4.2 추진기 상세 설계

본 추진기는 프로펠러 타입의 추진방식을 사용하며, 탈부착과 유지보수성 향상을 위해 모 터드라이버 내장형 수중추진기를 설계하였다. 사용목적에 적합한 프로펠러를 선정하고 프로 펠러의 구동에 필요한 모터 선정 및 장시간 해수의 환경에 적합한 구동형태를 적용하였다.

프로펠러의 자체 설계에 따른 효율문제로 상용의 제품을 모델로 하여 그 회전 속도를 변 수로만 두어 설계를 진행하였다.







Fig. 37 Underwater thruster assembly

#### 3.4.3 추진기 단독 성능시험

Collection

제작된 추진기의 성능 시험을 위해 Fig. 38와 같은 환경을 구성하였다. 측정용 스트럿 하 단에 추진기를 거치하고 상단에는 로드셀을 부착하여 추진기의 작동에 의해 발생하는 모멘 트를 측정하였다. 다시 힘 성분만을 분리하는 방식으로 추력을 측정하였다.



Fig. 38 Measure bollard force of thruster

측정값을 RPM에 따른 추력으로 변환하면 아래 Fig. 39와 같은 결과를 얻을 수 있었다.



Fig. 39 Thrust Force vs. RPM

제작된 수중추진기의 제원은 Table13과 같다. 추진기의 작동시간과 소모전류를 고려하였 을 때 최대 출력의 50% 수준에서 글라이더의 선체를 3knots까지 가속시킬 수 있을 것으로 예상하였다.

Table 13 Specification of Thruster

Index	Value	Units
Dimension	L0.215×d0.054(prop. d0.145)	m
Input Voltage	24.0	V
Ballad Power(Max.)	4.2	kgf



### 3.5 고정익 설계

글라이더는 중력과 부력의 차이로 지구중심으로 움직일 수 있는 연직방향의 에너지를 얻을 수 있다. 이러한 에너지 중에 일부를 글라이더의 양력으로 바꾸어 일정 거리를 전진 이 동할 수 있다. 받음각에 따른 글라이더 동체의 양력에 주익을 설치하여 발생하는 양력을 극 대화 할 수 있다.

일반적인 글라이더의 날개는 큰 AR값으로 저속에서의 양력효과를 최대화한다. 본 글라이 더에서는 수중의 밀도와 그 영향을 고려하여 주익의 크기를 고려하였고, 유사 형태의 수중 글라이더의 주익들과 비교하였다.

후퇴각(Sweep angle)을 가지는 날개는 수중에서 운동하는 동안 기진력(Vibromotive force) 을 감소시킬 수 있다. 글라이더가 수면 부근을 진행할 때 파도 등의 해수 운동에 따라 상하 동요, 피치운동에 따라 주익에 걸리는 모멘트 등이 변하게 되는데, 선체와 수직하게 배치된 날개는 파형에 의한 힘의 피크가 동시에 걸리므로 구조적 응력문제 발생과 선체의 거동에 외란으로 작용하게 된다. 후퇴각을 적용하면 힘의 피크가 작용하는 지점에 대해 위상 차이 가 발생하므로 응력집중을 회피할 수 있다.

Table 14 Specification of Fixed Wing

Index	Value	Units
Section	19453T flat plate	n/a
Planfrom Area	0.098	$m^2$
Aspect Ratio	6	n/a
Sweep Angle	20	deg.

### 3.6 방향타 설계

이전의 글라이더들에서 선체의 진행방향을 변경하기 위해서 사용된 방법은 다음과 같다.

- 고정익을 가진 유체내의 운동체가 진행방향을 축으로 경사(Rolling)하였을 때, 경사한 방향의 양력성분과 중력성분의 합으로 구심력이 발생하게 되고 이를 이용해 선회할 수 있다.
 선체를 경사시키기 위해서는 내부 질량의 이동시키거나, 날개의 받음각 차이를 만들어야 한다.

- 방향타를 사용하여 유체내의 압력 차이를 만들 수 있고, 이때 발생한 모멘트로 진행경





로를 변경할 수 있다.

본 글라이더는 외부의 추진기를 사용하므로 수면에서도 조향이 가능하도록 선회방식을 적 용하였다. 방향타를 조작하기 위해 별도의 구동기가 필요하며, 방향타는 선체 외부에 돌출 되어 있으므로 주항시의 저항을 최소화하는 형상으로 설계하여야 한다.

Index	Value	Units
Section	NACA0012	n/a
Planform Area	0.0118	$m^2$
Aspect Ratio	2.68	n/a
Span	0.180	m
Mean Chord	0.067	m
Maximum rudder angle	20	deg.

e an*u ul* 

#### Table 15 Specification of Rudder

# 3.7 구성 종합

설계 된 각각의 모듈을 전방 선체부, 페이로드 적재부, 후방 선체부에 배치하였다. 이들 각 부분은 방수 및 내압 구조를 가지며, 추후 페이로드 적재에 따라 유동적인 구조 변경이 가능하도록 하였다.

1945

Fig. 40에는 HUG의 3D모델링 선체 단면도로 내부 형상이 묘사되어 있다.



Fig. 40 Cross section of HUG

Fig. 41은 전방 선체부의 분해도이다. 전방 선체에는 주로 기구부적 요소인 부력엔진과 자 세제어기가 있다. 부력제어기의 주변으로 배터리를 무게추로 하는 자세제어기가 위치하여 공간을 활용하고 있다. 노즈콘 내부는 외부의 유체가 통할 수 있는 공간이며 해저면과 충돌 방지를 위한 센서인 Altimeter가 설치되어 있다.



Fig. 41 Exploded view of front hull assembly

Fig.42은 후방 선체부의 분해도이다. 내부에는 메인 제어 보드와 배터리, 센서 등이 내장 되어 있고, 테일콘 내부에는 추진기, 방향타 모듈, 날개 형상의 외부 안테나가 설치되어 있 다. 각각의 내압실린더는 공통으로 양측에 방수구조를 가지는 캡이 조립되며 내부에 장치들 을 보호하고 있다.



Fig. 42 Exploded view of rear hull assembly

Fig.43은 중앙 선체부로 양력을 발생시키는 날개와 외부 정보를 수집할 수 있는 센서를 장착할 수 있다. 외부의 유체가 드나들 수 있는 개방 구역이므로 부력을 발생시키지 않는 다. 설치되는 센서에 따라 부력량을 조절하기 위해 부력재를 내장할 수 있도록 하였다.

초기 설계사항으로 외장 DVL을 설치하여 AUV모드일 때, 초기 운동 및 항법 적용 검증

Collection

실험을 위해 보정을 위한 센서로 활용될 것이다.



Fig. 43 Exploded view of payload section

HUG의 외부 치수는 Fig.44와 같다. 외부 안테나는 외부 환경에 따라서 적용할 수 있도록 Pole type과 Fin type을 설계하였다.



Fig. 44 Exterior dimension of HUG

설계된 하이브리드 수중 글라이더의 외형 제원은 Table 16과 같다.

IndexValueUnitsLength1.97(with antenna 2.50)mDiameter0.22mWidth1.04mHeight0.45 (Cylinder Dia. 0.22)m

Table 16 Dimensions of HUG

또한, HUG의 설계된 질량 특성은 아래의 Table 17과 같다. 이론적으로 수상이 아닌 수중 의 운동체는 중성부력을 갖도록 하여야 하나 실제로 중성부력을 유지하는 것은 어려운 문제 이므로 임의의 양성부력을 가지도록 하였다.

Table	17	Origin	Parameter	of	HUG
-------	----	--------	-----------	----	-----

Index	Value	Units
Weight	50.50	kgf
Buoyancy	50.60	kgf
Center of Buoyancy	$x_{C\!B}$ =-0.96, $y_{C\!B}$ =0.00, $z_{C\!B}$ =0.00 (from Nose)	m
Center of Gravity	$x_{CG}$ =-0.96, $y_{CG}$ =0.00, $z_{CG}$ =0.01 (from Nose)	m

선체 기준으로 수평·수직에 대칭인 형상을 하고 있으므로 각각 다음의 Table 18과 같이 질 량관성모멘트를 갖는다.

Table 18 Moments of Inertia

Index	Value	Units
$I_{xx}$	0.33	$kg-m^2$
$I_{yy}$	6.83	$kg-m^2$
$I_{zz}$	6.75	$kg - m^2$



# 제 4 장 구동 성능 시험

## 4.1 자항 속도 측정

글라이더 후방에 설치된 추진기를 작동시켰을 때 도달 가능한 최대속도를 확인하기 위하 여 Fig. 45(a)의 국립해양조사원 수조동에서 실험을 수행하였다. 수조의 크기는 길이50m, 너 비 15m, 깊이 5~10m이다. Fig.45(b)은 조립된 상태를 보여주고 있으며 Fig.45(c)과 같이 수조 의 시작부분에 투하하였다. 길이방향으로 글라이더를 주항시키고 이때 선체중앙에 설치된 DVL(Doppler velocity logger)을 이용하여 속도를 측정하였다.



Fig. 45 Self-propulsion speed test

수조의 길이를 고려하여 글라이더 미션으로 30초동안 추진기를 작동하도록 하였으며, 결 과는 Fig. 46과 같다. 샘플링 타임은 0.03초 간격이며, 추진기 최대 회전수 2000rpm의 25%사 용일 때 속도이다. 가속구간을 거쳐 10초 이후 0.46m/s에 도달함을 확인하였다.





Fig. 46 Speed using thruster

## 4.2 조종성능 시험

Collection

글라이더가 항해하는 동안 계획된 항로를 유지하기 위해 조종성능이 필요하다. 글라이더 의 선회방식은 크게 Roll움직임으로 뱅킹(banking)각을 만들어 선회하거나, 선체 후방에 설치 된 러더를 이용하여 선수회두각을 만들 수 있다. 본 글라이더는 외부의 추진기로 수상에서 도 운용할 수 있는 플랫폼이므로 선체 후미에 러더를 설치하였다. 실험 조건은 앞의 자항 속도 측정의 경우와 같으며, 30초 동안의 미션으로 타각 15도, 추진기 사용률 25%로 설정하 였다. 측정은 글라이더 내부의 IMU(Inertial measurement unit)를 이용하였다.



Fig. 47 Maneuvering test

얻어진 결과는 Fig. 48과 같다. 추진기에 의해 최대속도에 도달하기까지 타력의 부족으로 상대적으로 적은 회두각(Yaw angle)을 보였으나, 10초 이후 일정속도 이후에는 회두각이 증 가함을 보였다. 또한, 선체의 Yaw움직임에 의해 Roll움직임도 영향을 받음을 알 수 있다.



Fig. 48 Maneuvering using rudder

## 4.3 수중 정지 자세 유지 시험

HUG의 내부에는 부력량 조절과 자세제어를 위한 구동기가 내장되어 있어 수중에서 활강 각이나 외란에 대해 안정적인 상태를 만드는데 이용된다. 3장에서 수학적으로 설계된 제어 기의 용량을 확인하고 실제 구동정도에 따라 캘리브레이션 하는 과정을 거쳤다.



Fig. 49 Actuators calibration in water tank



# 제 5 장 동역학 시뮬레이션

### 5.1 유체력계수 추정

### 5.1.1 좌표계 및 외력성분 정의

수중 글라이더는 몸체, 부력제어기, 내부 질량이동장치, 추진기, 수평 날개, 방향타 등으로 구성되어 있다. 이러한 장치들에 의한 부력변화, 관성력, 수중의 부가질량, 형상에 따라 그 운동특성이 결정되어 진다.

수중 글라이더의 위치는  $\eta_1$ 로 나타내며, O에 관한 합속도는  $v_1$ , 각 축의 각도와 각속도 는 각각  $\eta_2$ ,  $v_2$ 로 나타내며, 각 축의 힘과 모멘트의 합은  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ 로 식(27)~식(32)와 같이 나 타내었다.

$$\eta_{1} = (x, y, z)^{T}$$

$$\eta_{2} = (\phi, \theta, \psi)^{T}$$

$$v_{1} = (u, v, w)^{T}$$

$$v_{2} = (p, q, r)^{T}$$

$$(27)$$

$$(28)$$

$$(29)$$

$$(29)$$

$$(30)$$

$$\tau_{1} = (X, Y, Z)^{T}$$

$$(31)$$

$$\tau_2 = (K, M, N)^T \tag{32}$$

회전은 Euler각으로 나타나며, Yaw(ψ), Pitch(θ), Roll(φ)은 각각 오른손규칙에 따라 양의 값으로 Fig. 50에서처럼 표현된다.







Fig. 50 Coordinate frame on underwater glider

지구고정좌표계 내에서 물체의 운동 속도는 식(33)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$
(33)  
이때, 물체고정좌표계를 공간고정좌표계로 바꾸어 주는 변환행렬은 식(34)와 같다.  
$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$
(34)

회전성분에 대해서도 식(35)와 같이 나타낼 수 있으며, 변환행렬은 식(36)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$
(35)

$$J_{2}(\eta_{2}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\phi & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix}$$
(36)

무게중심과 부력중심의 위치벡터는 식(37)~식(38)과 같이 표시된다.

$$r_G = \begin{bmatrix} x_G \ y_G \ z_G \end{bmatrix}^T \tag{37}$$

$$r_B = \begin{bmatrix} x_B \ y_B \ z_B \end{bmatrix}^T \tag{38}$$

강체의 6자유도 운동방정식은 뉴턴의 운동방정식에서 유도되어 식(39)~식(44)로 나타낼 수

- 42 -



있다. 이때, 좌항은 질량이 m인 물체의 거동을 나타내고 우항은 외력을 나타낸다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X$$
(39)

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y$$
(40)

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pq - \dot{r}) + y_G(pr + \dot{q})] = Z$$
(41)

$$\begin{split} &I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ &+ m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \end{split} \tag{42}$$

$$\begin{split} & I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ & + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \end{split}$$
(43)

$$\begin{split} &I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\ &+ m[x_G(\dot{v} - wp + up) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N \end{split} \tag{44}$$

외형은 그 중심을 기준으로 각 평면에 대해 대칭인 형상을 하고 있으므로 원점에서의 관 성모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{o} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$
(45)

6자유도 운동방정식에 대해 식(45)를 정리하면 다음의 식(46)~식(51)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X$$
(46)

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y$$
(47)

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pq - \dot{r}) + y_G(pr + \dot{q})] = Z$$
(48)

$$I_{x}\dot{p} + (I_{z} - I_{y})qr + m[y_{G}(\dot{w} - uq + vp) - z_{G}(\dot{v} - wp + ur)] = K$$
(49)

$$\dot{I_yq} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M$$
(50)

$$I_{z}\dot{r} + (I_{y} - I_{x})pq + m[x_{G}(\dot{v} - wp + up) - y_{G}(\dot{u} - vr + wq)] = N$$
(51)

이때 외력항에 작용하는 힘을 구분하면 다음의 식(52)~식(53)과 같이 유체정역학적 힘 (Hydrostatic)과, 관성유체력(Inertial), 점성감쇠유체력(Damping), 제어유체력(Control)과 이에



따른 각각의 모멘트들이 있다.

$$\sum F_0 = F_{hydrostatic} + F_{inertial} + F_{damping} + F_{control}$$
(52)

$$\sum M_0 = M_{hydrostatic} + M_{inertial} + M_{damping} + M_{control}$$
(53)

다음의 유체력 계수들은 설계된 수중글라이더의 선체형상에 대하여 경험식을 이용하여 구 하였다(Prestero, 2001).

### 5.1.2 유체정역학적 작용력

외력항의 유체정역학적 계수 추정을 위해 선체의 자체 부력의 변화에 따른 영향을 고려하 여야 한다.

$$\begin{split} F_{hydrostatic} &= f_G - f_B \end{split} \tag{54} \\ M_{hydrostatic} &= r_G \times f_G - r_B \times f_B \end{aligned} \tag{55} \\ &\stackrel{?}{\sim} 6 \stackrel{?}{\sim} \stackrel{?}{\sim} \stackrel{*}{\sim} f_G - r_B \times f_B \end{aligned} \tag{55} \\ &\stackrel{?}{\sim} 6 \stackrel{?}{\sim} \stackrel{*}{\sim} \stackrel{!}{\sim} \stackrel{!}{\sim}$$

### 5.1.3 점성감쇠유체력

Collection

글라이더의 전방 병진 운동에 따른 항력을 식(62)와 같이 나타내었을 때 축방향 항력은 속도의 변화로만 고려되어 식(63)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = -\left(\frac{1}{2}\rho C_d A_f\right) u|u| \tag{62}$$



$$X_{u|u|} = -\frac{1}{2}\rho C_d A_f$$
(63)

각축방향과 모멘트 성분에 대해 나타내면 다음의 식(64)~식(71)과 같다.

$$Y_{v|v|} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{x_{tail}}^{x_{nose}} 2R(x)dx - \frac{1}{2}\rho C_{df}A_{fin}$$
(64)

$$Z_{w|w|} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2R(x)dx - \frac{1}{2}\rho C_{dw}A_{wing}$$
(65)

$$M_{w|w|} = \frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2x R(x) dx - \frac{1}{2} x_{fin} \rho C_{dw} A_{fin}$$
(66)

$$N_{v|v|} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2xR(x)dx + \frac{1}{2}x_{wing}\rho C_{dw}A_{wing}$$
(67)

$$Y_{r|r|} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2x|x|R(x)dx - \frac{1}{2}x_{fin}|x_{fin}|\rho C_{dw}A_{fin}$$
(68)

$$Z_{q|q|} = \frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2x |x| R(x) dx + \frac{1}{2} x_{wing} |x_{wing}| \rho C_{dw} A_{wing}$$
(69)

$$M_{q|q|} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2x^3 R(x) dx - \frac{1}{2} x_{fin}^3 \rho C_{dw} A_{fin}$$
(70)

$$N_{r|r|} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{tail}^{nose} 2x^3 R(x) dx - \frac{1}{2} x_{wing}^3 \rho C_{dw} A_{wing}$$
(71)

계산된 결과는 Table 19에 정리하였다.



Index	Value	Units
$X_{u u }$	-5.32	kg/m
$Y_{u u }$	-227.64	kg/m
$Z_{w w }$	-242.04	kg/m
$M_{w w }$	10.50	kg
$N_{v v }$	-15.71	kg
${Y}_{r r }$	-5.87	$kg\!-\!m/rad^2$
$Z_{d q }$	11.15	$kg\!-\!m/rad^2$
$M_{q q }$	-11.40	$kg-m^2/rad^2$
$N_{r r }$	-7.73	$kg - m^2/rad^2$

Table 19 Drag Coefficients

#### 5.1.4 관성유체력

# THE AND OCEAN

부가질량은 수중의 운동체가 가속도를 가질 때 영향을 받는 정도를 나타내며, PMM(Planar Motion Mechanism)과 같은 실험적인 방법이나 이론적인 방법으로 도출이 가능하다. 상대적 으로 소형인 수중로봇의 경우에는 실험적인 방법에서 측정하여야 하는 값이 센서의 노이즈 나 환경에 영향을 크게 받으므로 그 계수의 신뢰성이 부족할 수 있다. 본 논문에서는 이전 의 경험식들을 바탕으로 다음과 같이 부가질량계수를 산출하였다.

이상유체를 가정한 상태에서 6자유도 운동을 하는 물체에 작용하는 부가질량력은 다음과 같이 표시된다.(Newman, 1977)

$$F_j = -\dot{u}_i m_{ji} - \epsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{li} \tag{72}$$

$$M_{j} = -\dot{u}_{i}m_{j+3,1} - \epsilon_{jkl}u_{i}\Omega_{k}m_{l+3,i} - \epsilon_{jkl}u_{k}u_{i}m_{li}$$
(73)

 $\begin{array}{l} ( \ i=1,2,3,4,5,6 \ \ j\,k\,l=1,2,3 \ ) \\ u_i: \ (u_1,u_2,u_3)=(u,v,w) \\ (u_4,u_5,u_6)=(p,q,r) \\ \Omega_k: \ (\Omega_1,\Omega_2,\Omega_3)=(p,q,r) \end{array}$ 

Collection

여기서  $F_j$ 와  $M_j$ 는 각각 j방향 힘과 j축 주위의 모멘트를 나타낸다.  $m_{ji}$ 는 부가질량텐서 로서 i방향 운동에 기인하는 j방향의 부가질량 과 부가관성모멘트를 의미한다.  $\epsilon_{jkl}$ 은 부호 변환기로서 123, 231, 312의 경우에는 (+)의 부호를 취하고, 132, 321, 213의 경우에는 (-)의 부호를 취하도며, 같은 숫자가 두 개이면 (0)을 취하도록 한다.

축방향의 부가질량력을 추정하기 위해서 설계된 선체의 형상을 타원형으로 가정하고 장축 과 단축간의 비를 이용하여 다음과 같은 경험식(Blevins, 1979)을 이용하였다.

$$X_{\dot{u}} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{l}{2}\right) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \tag{74}$$

횡방향 부가질량력을 추정하기 위해서는 단일 원통형로 가정된 형상에 대해 경험식 (Newman, 1977)을 이용하였다.

$$m_a(x) = \pi \rho R(x)^2 \tag{75}$$

선체 진행방향을 기준으로 회전하는 성분에 대해 글라이더의 고정익과 방향타에 대한 성 분을 고려하여 경험식(Blevins, 1976)을 적용하였다.

$$m_{af}(x) = \pi \rho \left( a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2} \right)$$
(76)

$$Y_{v} = -\int_{tail}^{nose} m_{a}(x)dx - \int_{finr}^{finf} m_{af}(x)dx$$
(77)

$$Z_{w} = -\int_{tail}^{nose} m_{a}(x)dx - \int_{finr}^{finf} m_{af}(x)dx$$
(78)

$$M_{iv} = \int_{tail}^{nose} x m_a(x) dx - \int_{finf}^{finf} x m_{af}(x) dx \qquad (79)$$

$$N_{v} = -\int_{tail}^{nose} x m_{a}(x) dx + \int_{finf}^{finf} x m_{af}(x) dx$$
(80)

$$Y_{\dot{r}} = -\int_{tail}^{nose} x m_a(x) dx + \int_{finf}^{finf} x m_{af}(x) dx$$
(81)

$$Z_{\dot{q}} = \int_{tail}^{nose} x m_a(x) dx - \int_{finr}^{finf} x m_{af}(x) dx$$
(82)

$$M_{\dot{q}} = -\int_{tail}^{nose} x^2 m_a(x) dx - \int_{finf}^{finf} x^2 m_{af}(x) dx$$
(83)

$$N_{\dot{r}} = -\int_{tail}^{nose} x^2 m_a(x) dx - \int_{finf}^{finf} x^2 m_{af}(x) dx$$
(84)

Collection

Index	Value	Units
$X_{\dot{u}}$	-0.88	kg
$Y_{\dot{v}}$	-64.16	kg
$Z_{w}^{\cdot}$	-71.23	kg
$M_{\dot{w}}$	-4.39	kg-m
$N_{\dot{v}}$	-2.78	kg-m
$Y_{\dot{r}}$	-2.78	kg-m/rad
$Z_{\dot{q}}^{.}$	-2.68	kg-m/rad
$M_{\dot{q}}^{.}$	16.06	kg-m2/rad
$N_{\dot{r}}$	16.06	kg-m2/rad

Table 20 Added Mass Coefficients

## 5.1.5 제어유체력

추진기가 작동중일 때에 다음의 추진계수를 고려하여야 한다. 각각의 계수는 선체의 축방 향에 가해지는 외력 성분과 회전토크에 따른 경사성분으로 나타내어진다.

$$X_{prop} = -X_{u|u|}u|u| \tag{85}$$

$$K_{prop} = -K_{HS} = (y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi + (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi$$
(86)

또한, 제어유체력은 글라이더의 항해 중에 방향타(Rudder)의 작동에 따른 타력과 자세제 어기의 작동에 따라 무게중심 변화로 야기되는 날개(Blade)의 받음각의 변화에 따라 발생하 는 외력성분이다.

먼저 주익과 선체 형상에 의해 발생하는 양력을 고려하면 식(87)과 같으며,

$$L_{body} = -\frac{1}{2}\rho A_p c_{bd} u^2 \tag{87}$$

속도에 대해 식(88)의 비례관계가 생긴다.

$$Y_{uvl} = Z_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho \, d^2 c_{yd} \tag{88}$$

ρ는 선체 주변의 밀도,  $A_p$ 는 선체의 투영면적, u는 속도,  $c_{bd}$ 는 선체의 양력 계수를 나타 낸다. Hoerner에 의하면 선체의 직경과 선체길이의 비가 약 10일 때, 양력 계수는 0.03이다.



이 때 발생하는 선체의 모멘트는 다음의 식(89)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{uwl} = -N_{uvl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{bd} x_c$$
(89)

x 는 선체가 회전함에 따라 회전 중심과 기하학적 중심 간의 거리이다.

러더와 블레이드의 받음각에 따라 발생하는 양력과 모멘트는 다음의 식(90)~식(91)과 같다.

$$L_R = \frac{1}{2} \rho c_L S_R \delta_e u^2 \tag{90}$$

$$M_R = x_R L_R \tag{91}$$

$$L_B = \frac{1}{2}\rho c_L S_B \delta_e u^2 \tag{92}$$

$$M_B = x_B L_B \tag{93}$$

$$Y_{uu\delta_R} = -Y_{uvR} = \rho c_{L\alpha} S_R \tag{94}$$

$$Z_{uu\delta_B} = Z_{uwf} = -\rho c_{L\alpha} S_B \tag{95}$$

$$Y_{urR} = -\rho c_{L\alpha} S_R x_R \tag{96}$$

$$Z_{uqB} = \rho c_{L\alpha} S_B x_B \tag{97}$$

$$M_{uu\delta_B} = M_{uwB} = \rho c_{L\alpha} S_B x_B \tag{98}$$

$$N_{uu\delta_R} = -N_{uvR} = \rho c_{L\alpha} S_R x_R \tag{99}$$

$$M_{uqB} = N_{urR} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x^{2_{fin}}$$

$$\tag{100}$$



Index	Value	Units
$Y_{uv}$	-138.24	kg/m
$Y_{ur}$	6.91	kg/rad
$Z_{uw}$	-30.72	kg/m
$Z_{uq}$	-18.43	kg/rad
$M_{uw}$	6.91	kg/m
$M_{uq}$	-0.35	kg-m/rad
$N_{uv}$	-20.56	kg/m
$N_{ur}$	-8.68	kg-m/rad

Table 21 Control Force Coefficients

# 5.1.6 유체력 종합 계산

앞에서 고려된 각각의 계수들을 외력성분으로 대입하면 아래 식(101)~식(106)과 같이 나 타낼 수 있다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})]$$

$$= X_{HS} + X_{u|u|}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop}$$
(101)

$$\begin{split} m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\ = Y_{HS} + Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|r|}r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv \end{split}$$
(102)

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pq - \dot{r}) + y_G(pr + \dot{q})]$$

$$= Z_{HS} + Z_{w|w|}w|w| + Z_{q|q|}q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw$$
(103)

$$\begin{split} &I_{x}\dot{p} + (I_{z} - I_{y})qr + m\left[y_{G}(\dot{w} - uq + vp) - z_{G}(\dot{v} - wp + ur)\right] \\ &= K_{HS} + K_{p|p|}p|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \end{split} \tag{104}$$

$$\begin{split} &I_{y}\dot{q} + (I_{x} - I_{z})rp + m\left[z_{G}(\dot{u} - vr + wq) - x_{G}(\dot{w} - uq + vp)\right] \\ &= M_{HS} + M_{w|w|}w|w| + M_{q|q|}q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp \\ &+ M_{uw}uw + M_{uu\delta_{s}}u^{2}\delta_{s} \end{split}$$
(105)

$$= N_{HS} + N_{v|v|}v|v| + N_{r|r|}r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq$$
(106)  
+  $N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r$ 

내부의 이동질량과 부력조절장치의 운동으로 질량중심 $(r_G)$ 과 질량관성모멘트 $(I_0)$ , 부력중  $A(r_B)$ 이 실시간으로 변하게 된다.

- 50 -



$$r_G(t) = \frac{m_h r_h + m_h r_h + m_m r_m(t)}{m_t}$$
(107)

$$I_t(t) = (I_h - m_h \hat{r}_h \hat{r}_h) + (I_s - m_s \hat{r}_s \hat{r}_s) + (I_m - m_m \hat{r}_m(t) \hat{r}_m(t))$$
(108)

$$r_B(t) = \frac{V_{var}(t)r_{var}(t) + V_{fix}r_{fix}}{V_t(t)}$$
(109)

위의 식(107)~(109)를 비선현 6자유도 운동방정식에 적용하여 내부 이동질량 및 부력조절 에 따른 글라이더의 수중운동을 묘사할 수 있다.(김동희, 2014)

#### 5.2 시뮬레이션

Collection

HUG의 운동을 예측하고, 앞서 구축된 6자유도 운동방정식의 유효성을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink를 이용한 동역학 시뮬레이터를 Fig. 51와 같이 구성하였다. 아래의 시뮬레 이터는 글라이더의 운동을 명령하는 부분과 명령에 따라 구동기의 작동을 모사하는 부분, 외력에 따라 글라이더의 운동을 계산하는 부분으로 나뉜다.



Fig. 51 Hybrid Underwater Glider Simulator

수중 글라이더에 적용된 구동기는 부력, 무게중심, 선수회두각, 전방추력을 제어할 수 있 는 4가지이다. 각각의 구동기는 실제 설계된 모터와 구조에 따라 구현하였다. 수중에서 톱 니모양의 글라이딩 궤적을 모사하기 위한 알고리즘에 따라 구동기들이 작동하게 된다.

부력제어기의 작동은 제어기 없이 목표로 하는 수심에 도달 할 수 있도록 일방적인 작동 을 하게 된다. 목표수심에 따라 해저면 방향으로는 흡입작용을 하고 수면방향으로는 토출작 용을 하도록 하였다. 자세제어기는 수중글라이더가 활강하는 동안 안정적인 자세와 날개가 적절한 받음각을 유 지할 수 있도록 작동한다.

글라이딩 운동 중에 해저면 충돌과 해수면 노출방지를 위해 부력제어기와 자세제어기의 복합적인 구동이 고려되어야 한다. 시뮬레이터 상에서 목표로 하는 수심의 일정 비율에서 미리 부력제어기를 작동하여 홉입/토출 작동을 하여야 하고 이때 자세제어기를 통해 자세 안정성을 도모하여야 하는 것이다. 예를 들어 음성부력으로 잠항중인 글라이더가 해저면에 접근함에 따라 그 속도와 방향을 변경하여야 하는데 부력제어기의 구동속도를 고려하여 중 성부력을 거쳐 양성부력이 되어 궤적을 변경할 수 있도록 미리 조정되어야 하는 것이다.



Fig. 52 X-Z Plane Trajectory of Underwater Glider

시뮬레이션을 통해 글라이더 성능의 지표인 항해속도를 추정하기 위해 3장과 4장에서 예 측된 자료를 적용하였다. 앞의 조건을 기준으로 변경 가능한 범위에서 다양한 운용 성능을 예측하는 것을 본 시뮬레이션의 목적으로 한다.

1015

#### 5.2.1 활강각에 따른 최고 속도 및 구간거리

Collection

수중 글라이더의 활강각에 따라 최고 속도 및 한 사이클 잠항/부상에 따른 항해 거리를 다 음의 Table 22와 같이 나타내었다. 각 케이스별로 35°~20°(Fig.50(a)~(d))까지 활강각을 변화 시켰으며, 이때 받음각의 변화(Fig.51(a)~(d))와 활강거리의 변화로 부상할 때의 위치를 예측할 수 있다. 시뮬레이터 상에서 자세를 제어하는 입력치는 활강각이며, 이는 글라이더의 전진방 향과 침하방향에 대한 비로 나태나며 내부의 자세제어기를 통해 활강각을 제어토록 하였다.



Index	case1	case2	case3	case4
Dischargable Volume(cc)	±450	±450	±450	$\pm 450$
Desire Glide Angle(deg)	±35	±30	±25	±20
Attack of Angle(deg)	5.21	6.9	8.2	10.2
Cycle Distance(m)	452	612	707	806
Maximum Speed(m/s)	0.78	0.67	0.59	0.51

Table 22 Velocity and cycle distance by glide angle

X-Z plane X-Z plane Ê -100 Ê -100 -200 -200 x(m) x(m) u velocity u velocity (s/ɯ)n (s/u)n x(m) x(m) Theta Angle Theta Angle theta(deg) theta(deg) -50 -100 1200 1400 x(m) x(m) (b) (a) X-Z plane X-Z plane 4 E .100 Ê -100 -200 -200 1200 1400 x(m) x(m) u velocity u velocity (s/u)n (s/ɯ)n x(m) x(m) Theta Angle Theta Angle theta(deg) theta(deg) 

Fig. 53 Simulation by glide angle

x(m)

(d)

x(m)

(c)





## 5.2.2 부력제어량에 따른 최고 속도 및 소모전력량

내부 액츄에이터의 전력소모중 대부분을 차지하는 부력제어기의 작동에 따라 항해거리와 그 속도가 결정된다. 따라 부력제어량에 따른 최고속도와 그 소모 전력량에 대한 계산을 수행하 였다.





Fig. 55 Velocity vs. Buoyancy variation

최대 부력 제어량을 450cc부터 최소 150cc까지 각 경우를 고려하였다. 200m수심에서 토 출과 수심 10m 부근에서 흡입을 반복한다는 시나리오에서 소모전력량을 계산하였다. 수중 글 라이더의 총 내부 에너지에서 매회 사용량을 차감하는 방식으로 각각의 항해거리와 항해기간 을 Table 23에 나타내었다. 예시로 적용된 내부 에너지는 상용 글라이더들 중 외형 치수가 유사한 Table 1의 모델들을 기준으로 8MJ을 적용하였다. 이중 80%의 전력량을 배정하였을 때의 경우이다.

Collection

Index	case1	case2	case3	case4	case5
Dischargable Volume(cc)	±450	±350	±250	±200	±150
Desire Glide Angle(deg)	±25	±25	±25	±25	±25
Est. Power (outlet, J)	2909	2286	1662	1350	1039
Est. Power (inlet, J)	145	114	83	67	51
Cycle times(ref. 8MJ)	2095	2666	3667	4515	5871
Endurance(distance, km)	1481	1885	2593	3193	4151
Endurance(days)	21.1	30.2	48.8	67.2	159.6

Table 23 Velocity and power by Buoyancy variation





## 제 6 장 결론

본 연구에서는 200m급 운항 수심을 목표로 하는 복합추진 방식의 수중글라이더 플랫폼을 설계 및 제작하고, 수학적으로 계산된 결과와 모형실험 결과 등을 비교하여 실해역의 운동 성능에 관해 연구하였다.

수중에서 정상상태의 운동은 양항력을 고려하여 추정하고, 목표로 하는 1knots의 주항 속 도를 얻기 위해 부력제어용량과 그에 적합한 구동모터를 선정하였다. 최적의 운동 상태를 만들기 위해 톱니 모양의 주항 궤적에서 잠항각도를 25°~35°로 구하였다. 자세 제어기의 무게추 이동에 따라 전후동요 각도를 조절할 수 있으며, 그 각도를 모멘트법에 의해 계산하 고 실제 모형을 통한 캘리브레이션 과정을 거쳐 수정하였다.

경험식을 이용하여 선체 외형을 설계하였고, 전산유체해석을 통해 계산하였을 때 기존의 상용 수중운동체에 준하는 유체정역학적 계산 결과를 얻었다. 추가적으로 내압성능 향상과 모듈화를 위해 선체를 구조적으로 나누어 설계하였고, 이전의 연구결과에 비교하여 같은 두 께의 선체에서 직경과 길이에 대해 각각 1.1배와 0.42배인 본 선체에서 좌굴대응 성능은 2 배 이상으로 계산되었다.

외부 추진기 사용에 따른 추진성능과 러더를 이용한 조종성능을 확인하기 위하여 수조 실 험을 수행하였으며, 일정 구역 내에서 추진기의 25%출력으로 선체를 0.46m/s까지 가속하며 초기 계산결과에 근접한 결과를 확인하였다.

수중 글라이더의 외적 거동을 만드는 내부의 구동기의 작동에 따른 선체의 운동성을 계산 하고 소모되는 전력량을 고려하여 실제 운용기간을 예측하였다. 수중 운동체의 6자유도 방 정식을 적용한 시뮬레이터를 구성하여 거동을 모사하였다. 시뮬레이션 결과에 따라 수중 글 라이더의 항해속도와 그에 따른 항해거리의 실질적 상관관계를 나타내었다.

자료를 바탕으로 하이브리드 수중 글라이더의 실해역 성능을 추정하고 경험식 적용의 타 당성 연구가 수행되었다. 광범위한 실험환경과 고비용이 투자되는 플랫폼 개발 단계에서의 연구목적 차원의 효율적인 플랫폼 개발이 이루어졌다.



Collection

## 참고문헌

- 김동희 등, 2014. 이동질량장치와 부력엔진을 포함한 무인 수중글라이더의 동역학 모델링 및 운동성능 해석. *한국해양공학회지*, 28(5), 466-473.
- 박종진, 2013. 해양 글라이더에 관하여, Ocean and Polar Research. 35(2), pp.107-121.
- 하지훈, 2015. 하이브리드 수중 글라이더 설계 연구, 석사학위, 부산: 한국해양대학교.
- D.F.Myring, 1976. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. *Aeronautical Quarterly*, 27(3), pp.186–194.
- Fossen, T. I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York.
- John N. Newman, 1977. Marine Hydrodynamics. MIT Press, Masschusetts
- Joshua G. Graver, 2005. *Underwater gliders: Dynamics, control and Design*. Ph.D. Princeton university
- N. E. Leonard and J. G. Graver, 2001. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders. *IEEE Journal of Oceanic Engineering, Special Issue on Autonomous Ocean Sampling Networks*, 26(4), pp.633–645.
- Rovert. D. Blevins, 1979. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Kreiger Publishing, Florida.
- Sighard F. Hoerner and Henry V. Borst, 1985. *Fluid Dynamic Lift*. Published by author, second edition.
- Stommel, H., 1989. The Slocum mission. Oceanography, 2(1), pp.22-25.
- Timothy Prestero, 2001. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the *REMUS autonomous underwater vehicle*. Master. Massachusetts institute of technology