



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)



석사학위논문

만타형 무인잠수정의 자율운항 성능시험에 관한 연구

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

고 성 협

2012년 2월



만타형 무인잠수정의 자율운항 성능시험에 관한 연구

지도교수 배진호

고성협

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2012년 2월

고성협의 공학 석사학위 논문을 인준함

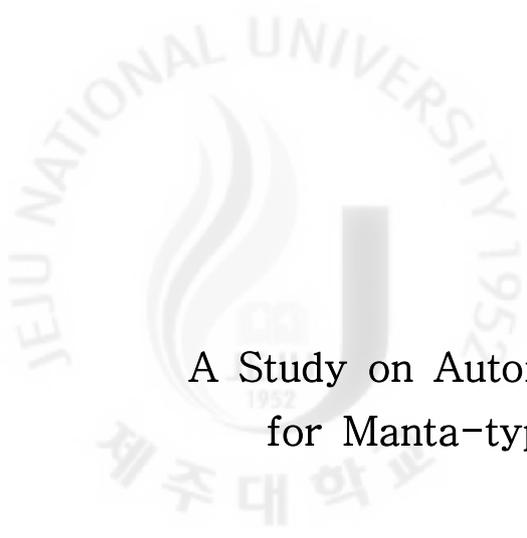
심사위원장 _____ 조 일 형 (인)

위 원 _____ 김 준 영 (인)

위 원 _____ 배 진 호 (인)

제주대학교 대학원

2012년 2월



A Study on Autonomous Navigation Experimental Test
for Manta-type Unmanned Underwater Vehicle

Sung-Hyub Ko
(Supervised by professor Jinho Bae)

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

2012. 2

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

SUMMARY

This thesis describes mathematical modeling, system design, and experimental test for Manta-type Unmanned Underwater Vehicle. Mathematical modeling of vehicle has been made of 6-DOF equations of motion and hydrodynamic coefficients that calculated by PMM test. Dynamic performance test was comparing simulation result with free-running test. Simulation program was made by Matlab of Simulink. The vehicle type is special appearance such as Manta-type and its dimensions are 1.5m(L) × 0.55m(B) × 0.28m(H). The vehicle has equipped one 350 watt thruster for longitudinal propulsion, one rudder for heading angle control and four elevators for depth control. The sensor for measuring location and position information are DVL, Pressure sensor, GPS, Gyrocompass. All sensors are controlled by on-board computer. Free-running test was performed at yacht harbor in Korea Maritime University. Aim of this test is to compare the simulation result and dynamic performance of Manta-type UUV. Experimental test was performed such as surge, sway, and heave motions of Manta-type UUV by PID controller and finally, autonomous navigation control was performed.

목 차

List of table	I
List of figure	II
1. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 내용	2
2. 수학 모델링 및 제어기 설계	4
2.1 만타형 무인잠수정의 수학적모델	4
2.2 6자유도 운동방정식	5
2.3 운동 성능해석	8
2.3.1 시뮬레이션 프로그램	8
2.3.2 운동성능 시뮬레이션	9
2.4 제어기 설계	12
2.4.1 수심 제어	13
2.4.2 방향 제어	13
2.5 제어성능 해석	14
2.5.1 제어 시뮬레이션 프로그램	14
2.5.2 제어성능 시뮬레이션	15
3. 만타형 잠수정 설계	20
3.1 설계목표	20
3.2 만타형 잠수정 제작	21
3.2.1 선형(Hull shape)	23
3.2.2 부력재(Buoyancy material)	24



- 3.2.3 내압용기(Pressure Housing) 24
- 3.2.4 추진기(Thruster) 26
- 3.2.5 수직타와 수평타 27
- 3.3 계측 및 제어 시스템 29
- 3.4 센서 및 전원 33
 - 3.4.1 DVL(Doppler Velocity Log) 34
 - 3.4.2 자이로 컴파스(Gyrocompass) 35
 - 3.4.3 압력센서 35
 - 3.4.4 GPS(Global Positioning System) 37
 - 3.4.5 배터리 및 전원회로 38
 - 3.4.6 통신 39

- 4. 실험역 성능 시험 40**
 - 4.1 운동성능 시험 40
 - 4.1.1 직진 운항 41
 - 4.1.2 수평 선회 42
 - 4.1.3 수평 지그재그 44
 - 4.2 자율운항 성능시험 45
 - 4.2.1 방향제어 45
 - 4.2.2 수심제어 47
 - 4.2.3 자율경로주행 48

- 5. 결론 51**

- 참고문헌 53**

List of table

Table 1. Notations	5
Table 2. Actual dimension of Manta-type type UUV	20
Table 3. Principal dimensions of Manta-type UUV	21
Table 4. Specification of pressure housing	25
Table 5. Specification of Tecadyne thruster model 300	27
Table 6. Specification of digital servo EX-106+	28
Table 7. Specification of on-board PC	31
Table 8. Specification of NI USB-6009(DAQ Board)	32
Table 9. Specification of DVL	34
Table 10. Specifications of TCM3(Tilt compensated 3-axis compass module)	35
Table 11. Specifications of pressure sensor	36
Table 12. Specifications of GPS	37

List of figure

Fig. 1. Manta-type UUV	3
Fig. 2. Coordinate system	4
Fig. 3. Simulation program for Manta-type UUV	8
Fig. 4. Trajectory in horizontal plane	9
Fig. 5. Yaw angle and rudder angle	9
Fig. 6. Trajectory in horizontal plane	10
Fig. 7. Yaw angle and rudder angle	10
Fig. 8. Trajectory in horizontal plane	11
Fig. 9. Yaw angle and rudder angle	11
Fig. 10. Simulation program using Simulink for Manta-type UUV	14
Fig. 11. Trajectory in vertical plane	15
Fig. 12. Trajectory in horizontal plane	15
Fig. 13. Vertical and horizontal plate angle	16
Fig. 14. Trajectory in 3D plane	16
Fig. 15. Trajectory in horizontal plane	17
Fig. 16. Heading control result	17
Fig. 17. Vertical and horizontal plate angle	18
Fig. 18. Trajectory in horizontal plane	19
Fig. 19. Yaw and desired yaw angle	19
Fig. 20. Basic concept of Manta-type UUV	20
Fig. 21. Overview of Manta-type UUV	22
Fig. 22. Side view of Manta-type UUV	22
Fig. 23. Back view of Manta-type UUV	23
Fig. 24. General arrangement of Manta-type UUV	23
Fig. 25. Hull shape	24
Fig. 26. Electronic pressure housing	25

Fig. 27. Servo pressure housing	26
Fig. 28. Floor plan of Tecnadynne thruster Model 300	26
Fig. 29. Thruster mounting	27
Fig. 30. Digital Servo EX-106+	28
Fig. 31. Servo motor and horizontal control fin	29
Fig. 32. Servo motor and vertical control fin	29
Fig. 33. Block diagram of system for manta-type UUV	30
Fig. 34. On-board PC(Zotec Geforce 9400-ITX)	31
Fig. 35. NI USB-6009(DAQ Board)	31
Fig. 36. Control program(Labview print panel)	32
Fig. 37. Vertical motion control program	33
Fig. 38. Horizontal motion control program	33
Fig. 39. NavQuest600 Micro DVL	34
Fig. 40. TCM3(Tilt Compensated 3-axis compass module)	35
Fig. 41. Pressure sensor	36
Fig. 42. Pin connection of pressure sensor	36
Fig. 43. FGPMOPA1 GPS module	37
Fig. 44. Lithium-Polymer battery	38
Fig. 45. Power converting circuit	39
Fig. 46. Test site of Manta-type UUV	40
Fig. 47. Test site of Manta-type UUV	41
Fig. 48. Performance test of Manta-type UUV	41
Fig. 49. Trajectory in horizontal plane	42
Fig. 50. Yaw angle	42
Fig. 51. Trajectory in horizontal plane	43
Fig. 52. Yaw angle	43
Fig. 53. Trajectory in horizontal plane	44
Fig. 54. Yaw angle	44
Fig. 55. Trajectory in horizontal plane	45

Fig. 56. Yaw angle and rudder angle 46

Fig. 57. Trajectory in horizontal plane 46

Fig. 58. Yaw angle and rudder angle 47

Fig. 59. Trajectory in vertical plane 47

Fig. 60. Trajectory in horizontal plane 48

Fig. 61. Trajectory in 3D plane 48

Fig. 62. Navigation control site for Manta-type UUV 49

Fig. 63. Trajectory in horizontal plane 50

Fig. 64. Yaw angle and rudder angle 50

1. 서론

1.1 연구 배경

육상의 매장된 자원이 점차 고갈되고 있으며 이를 대체할 자원의 보고로서 해양 자원이 중요성이 증대되고 있다. 해양 자원을 개발하기 위해서 다양한 해양 장비 및 시설에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중 극한 환경 속에서 인간을 대신해서 작업을 할 수 있는 해양 장비에 대한 연구로서 무인잠수정이 연구되고 있으며 수중탐사, 해저지형 조사, 해저자원탐사, 해양환경 조사 및 감시 그리고 해난구조 등의 많은 분야에 사용된다. 최근에는 군사적 목적으로 정찰, 조사, 기만, 어뢰의 설치, 발견 및 제거 등의 군사적 목적으로 이용하려는 연구가 진행되고 있다.

UUV(Unmanned Underwater Vehicle)는 자율적으로 운항하는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 외부에서 조종을 하는 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 로 분류된다. AUV는 운항 목적에 맞는 용량의 배터리를 탑재하여 장거리 주행에 사용되며 ROV는 모선으로부터 케이블(Tether)을 통해 전력을 공급받아 운용되며 특정 위치에서 작업을 하는데 사용된다. ROV의 탐사심도가 깊어지면서 동력을 공급받는 케이블이 굵어지고 길어지면서 유체저항이 증가하고 운동성능에 큰 영향을 줌에 따라 자체적인 추력과 상황판단으로 자율 운항이 가능한 AUV에 관한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다.

현재 선진국에서는 무인잠수정의 중요성으로 인해 연구개발에 대한 투자를 지속적으로 확대 되고 있으며 미국의 NUWC(Naval Undersea Warfare Center)에서는 1990년대 중반부터 Manta project의 일환으로 MTV(Manta Test Vehicle)에 대한 연구를 진행하였으며 설계와 실험을 실시하였다. MTV는 평상시에는 잠수함에 부착되어 이동하다가 필요시에만 모함인 잠수함에서 분리되어 해당 지역의 자료 획득 및 임무를 수행하는 역할을 담당하게 된다. 현재 NUWC에서는 개선된 모델을 제안하고 계속 연구가 진행되고 있다. 최근 국내에서도 민간 연구소, 산업체 및 학계에서 무인잠수정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 대부분 선진국에 비해 낮은 수준이며 군용이나 산업적으로 실용화가 이루어지지 못하고

있다. 이에 따라 무인 잠수정에 대한 연구개발의 필요성이 커지고 있으며 무인 잠수정의 실용화를 위한 기초 연구 개발로서 설계, 자율운항, 수중통신, 소나 등의 많은 분야에 대한 연구가 필요하다.

1.2 연구 내용

본 논문에서는 무인잠수정의 실용화를 위한 기술 중 자율운항에 대한 연구를 목표로 한다. 이를 위해 만타형 잠수정의 기초연구 중 유체력 계수에 대한 연구 내용을 이용하여 만타형 무인잠수정에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 Matlab의 Simulink를 이용하여 6자유도 운동방정식에 대입하여 실시하였으며 이 때 유체력 계수는 PMM 테스트와 대각반응각 시험 등으로 계측된 만타형 잠수정의 유체력 계수를 이용하였다[5][6][7].

시뮬레이션을 토대로 자율운항을 위한 만타형 무인잠수정을 설계 및 제작 하였다. 제작된 만타형 무인잠수정은 Fig. 1과 같으며 운동성능을 파악하기 위한 운동성능 시험을 하여 운동성능을 파악을 하였다. 운동성능시험 결과 3.5m의 선회 반경을 가지며 $-30^{\circ}/30^{\circ}$ 지그재그에서는 2.3m가량의 방향전환성능을 가지고 있음을 파악할 수 있었다. 이는 30m의 정사각형 경로로 이동이 충분히 가능함을 예상할 수 있었다. 자율항주 시험을 위하여 제어실험으로 수심제어, 방향제어를 실시하였다. 반복적인 제어실험을 통하여 제어기의 게인을 튜닝하였다. 최종적으로 실험역에서 자율운항 실험을 실시하였으며 기본적인 자율운항을 할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 수학 모델링을 위한 6자유도 운동방정식에 대한 표기법 및 방정식에 대해 명시하고 PID 제어기를 설계하며 운동성능과 제어성능에 대한 시뮬레이션을 통해 운동성능을 파악한다. 3장에서는 만타형 무인잠수정의 하드웨어 설계 및 제작을 설명한다. 또한 자율운항 시스템 구축을 위한 센서의 구성에 대해 설명하며 Labview를 이용하여 구성한 자율운항 프로그램에 대해서 설명하였다. 4장에서는 운동성능 시험에 대한 결과를 확인하여 Matlab의 Simulink를 이용한 운동성능 시뮬레이션 결과와 비교한다. 또한 자율운항 성능시험을 위한 수심제어, 방향제어 실험을 통하여 제어 게인의 튜

닝을 한다. 최종적으로 만타형 무인잠수정의 자율운항 성능시험 결과에 대해서 설명한다. 5장 결론에서는 제작된 잠수정에 대한 실험역 성능시험, 제어실험 및 자율운항 성능시험을 통해서 얻어진 결과를 설명하고 추후 연구에 대해서 기술하였다.



Fig. 1. Manta-type UUV

2. 수학 모델링 및 제어기 설계

2.1 만타형 무인잠수정의 수학모델

잠수정의 수학적 모델은 6자유도 운동방정식으로 나타낸다. 6자유도 운동방정식은 상당수의 유체동역학계수에 의한 힘과 모멘트로 표현된다. 만타형 무인잠수정의 수학모델을 정의하기 위해 선체를 강체라 가정하고 Fig. 2와 같이 선체고정좌표계(Body fixed coordinates)와 지구고정좌표계(Earth fixed coordinates)를 사용하였으며 선체고정좌표계의 원점을 상하좌우의 중심부로 정하여 선수방향을 x , 우현방향을 y , 연직 아래 방향을 z 축으로 하는 오른손 좌표계를 사용하였다.

만타형 무인잠수정의 x, y, z 축에 대한 병진운동과 회전운동을 6자유도 운동으로 표현하였으며 사용된 좌표축과 명칭은 Table 1과 같다.

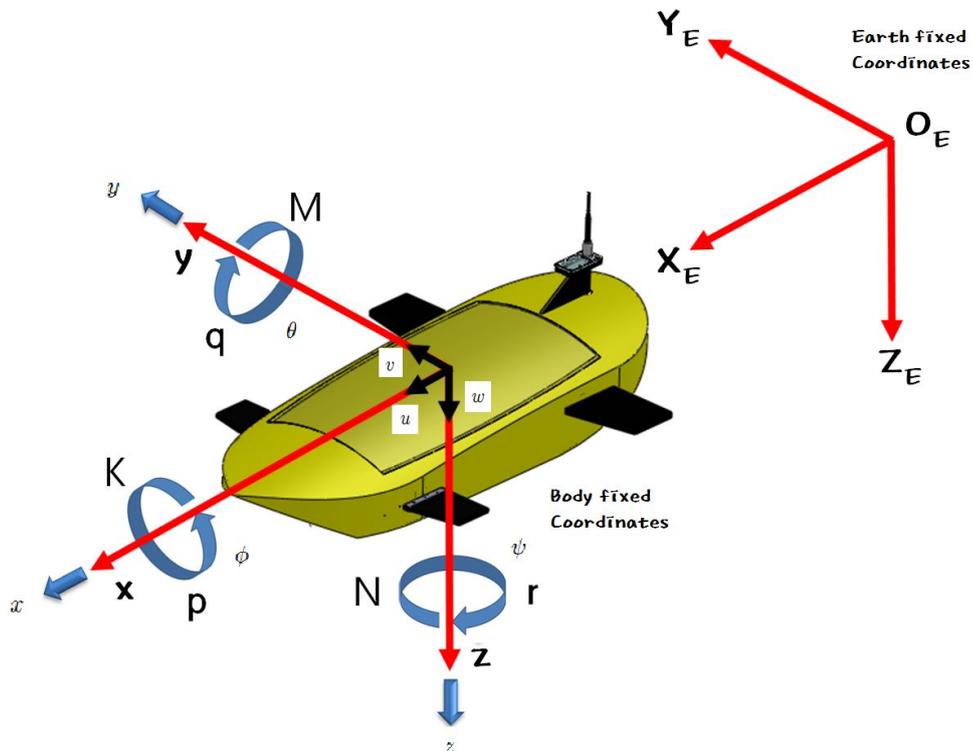


Fig. 2. Coordinate system

Table 1. Notations

Classification	Axis	Motion	Displacement	Velocity	Force & Moment
Translational motion	x -axis	Surge	x	u	X
	y -axis	Sway	y	v	Y
	z -axis	Heave	z	w	Z
Rotational motion	x -axis	Roll	ϕ	p	K
	y -axis	Pitch	θ	q	M
	z -axis	Yaw	ψ	r	N

2.2 6자유도 운동방정식

무인잠수정의 6자유도 운동방정식은 Abkowitz가 전개한 기본식을 사용하였다 [11].

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

식 1에서 X_G, Y_G, Z_G 는 잠수정의 중력 중심의 좌표이며 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 는 2차 관성 모멘트, $\dot{}$ 는 미분항을 나타낸다. 또한 식 1에서 우변은 각 방향의 힘 X, Y, Z 와 모멘트 K, M, N 에 중력, 부력, Hull 유체력, 제어 유체력을 대입한 후 정리하면, 좌변에서는 힘과 모멘트를 우변은 중력, 부력, Hull 유체력, 제어 유체력을 나타낸 외력을 포함하는 만타형 무인잠수정의 6자유도 운동방정식(식 2~7)을 나타낼 수 있다[6].

Surge Equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 (X_{qq}' q^2 + X_{rr}' r^2 + X_{pr}' pr) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 (X_u' \dot{u} + X_{vr}' vr + X_{wq}' wq) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 (X_u' uU + X_{ww}' w^2) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 \{ X_{\delta r \delta r}' u^2 \delta r^2 + X_{\delta s \delta s}' u^2 (\delta s + \delta_{so})^2 + X_{\eta s \eta s}' u^2 \eta s^2 \} & \\
 - (W - B) \sin \theta + X_P &
 \end{aligned} \tag{2}$$

Sway Equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{v} - wp + ur + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 (Y_r' \dot{r} + Y_p' \dot{p} + Y_{p|p}' p|p| + Y_{pq}' pq) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 (Y_v' \dot{v} + Y_{wp}' wp + Y_r' ur + Y_p' up) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 (Y_v' vU + Y_{vvv}' \frac{v^3}{U} + Y_{\delta r}' u^2 \delta r) & \\
 + (W - B) \cos \theta \sin \phi &
 \end{aligned} \tag{3}$$

Heave Equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pr - \dot{q})] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 (Z_q' \dot{q} + Z_{pp}' p^2 + Z_{pr}' pr) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 (Z_w' \dot{w} + Z_{vp}' vp + Z_q' uq) & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 \left\{ Z_{*}' u^2 + Z_w' uw + Z_{ww}' w^2 + Z_{www}' \frac{w^3}{U} + Z_{\delta s}' u^2 (\delta s + \delta_{so}) \right\} & \\
 + (W - B) \cos \theta \cos \phi &
 \end{aligned} \tag{4}$$

Roll Equation

$$\begin{aligned}
 I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m[z_G(\dot{v} - wp + ur) + x_G z_G(\dot{r} + pq)] = \\
 + \frac{\rho}{2} L^5 (K_p' \dot{p} + K_r' \dot{r} + K_{qr}' qr + K_{p|p|}' p|p|) \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 (K_p' up + K_r' ur + K_v' \dot{v} + K_{wp}' wp + K_{vq}' vq + K_{wr}' wr) \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 (K_v' vU + K_{vvv}' \frac{v^3}{U} + K_{vw}' vw + K_{\delta r}' u^2 \delta r + K_{\eta s \eta s}' u^2 \eta s) \\
 - (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi
 \end{aligned} \tag{5}$$

Pitch Equation

$$\begin{aligned}
 I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp) + x_G z_G(p^2 - r^2)] = \\
 + \frac{\rho}{2} L^5 (M_q' \dot{q} + M_{pr}' pr + M_{rr}' r^2 + M_{pp}' p^2 + M_{q|q|}' q|q|) \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 (M_w' \dot{w} + M_q' uq + M_{vr}' vr + M_{vp}' vp) \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 \left\{ (M_s' u|u| + M_w' uw + M_{ww}' w^2 + M_{www}' \frac{w^3}{U} + M_{\delta s}' u^2 (\delta s + \delta_{so})) \right\} \\
 - (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi
 \end{aligned} \tag{6}$$

Yaw Equation

$$\begin{aligned}
 I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) + z_G x_G(qr - \dot{p})] = \\
 + \frac{\rho}{2} L^5 (N_r' \dot{r} + N_p' \dot{p} + N_{pq}' pq + N_{qr}' qr + N_{r|r|}' r|r|) \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 (N_v' \dot{v} + N_r' ur + N_p' up + N_{wp}' wp + N_{vq}' vq) \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 (N_v' vU + N_{uv}' uv + N_{vvv}' \frac{v^3}{U} + N_{uvv}' \frac{uv^3}{U^2} + N_{\delta r}' u^2 \delta r) \\
 + (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi
 \end{aligned} \tag{7}$$

잠수정의 위치 및 자세를 표현하기 위한 선체고정좌표계에서 지구고정 좌표계로 변환은 오일러 각(Euler Angle)의 좌표변환식을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\phi} &= p + \dot{\psi} \sin\theta \\
 \dot{\theta} &= q \cos\phi - r \sin\phi \\
 \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos\theta}(q \sin\phi + r \cos\phi) \\
 \dot{x} &= u \cos\theta \cos\psi + v(\sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\theta \sin\psi) + w(\cos\theta \sin\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \\
 \dot{y} &= u \cos\theta \sin\psi + v(\sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\theta \cos\psi) + w(\cos\theta \sin\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \\
 \dot{z} &= -u \sin\theta + v \sin\phi \cos\theta + w \cos\phi \cos\theta
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.3 운동성능 해석

만타형 무인잠수정을 제작하기 전에 수학 모델을 이용하여 운동성능을 파악을 하여 실제 제작한 잠수정의 운용에 이용하기 위해서 운동성능 해석을 하였다. 운동성능 해석에서 조류나 바람의 영향을 고려하지 않고 실시하였다.

2.3.1 시뮬레이션 프로그램

만타형 무인잠수정의 운동성능 해석에는 Matlab의 Simulink가 사용되었으며 6자유도 방정식에는 PMM 테스트를 이용하여 계산된 유체력 계수를 사용하였다. 사용된 유체력 계수에 대한 값은 부록에 명시하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Fig. 3와 같다.

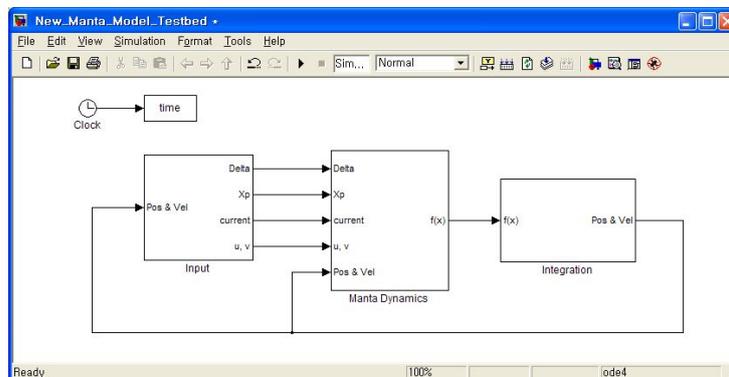


Fig. 3. Simulation program for Manta-type UUV

2.3.2 운동성능 시뮬레이션

시뮬레이션은 운동성능 시험 결과와 비교할 수 있도록 실험과 같은 조건에서 할 수 있도록 하였다. 기초적인 운동성능 시험을 위해서 직진, 수평 선회, 수평 지그재그 운항에 대해서 실시하였다.

1) 직진 운항

만타형 잠수정의 직진 성능을 확인하기 위해서 직진주행 시뮬레이션을 시행하였다. 추진기의 추력을 2.2V로 하였으며 수직타의 각도는 0° 로 설정하였다. Fig. 4는 수평면 이동경로를 보이고 있으며 추진기 추력의 40%에서 0.8m/s의 속도로 진행하였다.

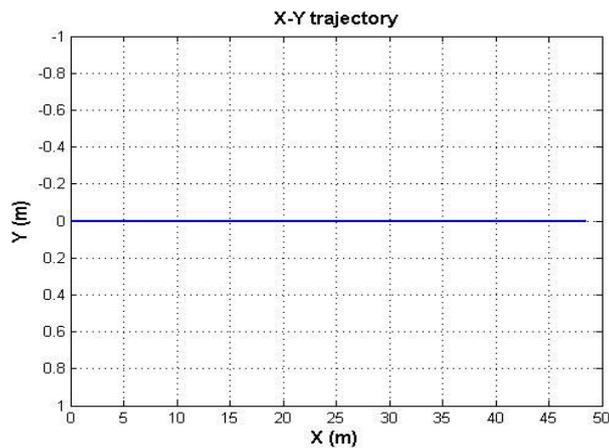


Fig. 4. Trajectory in horizontal plane

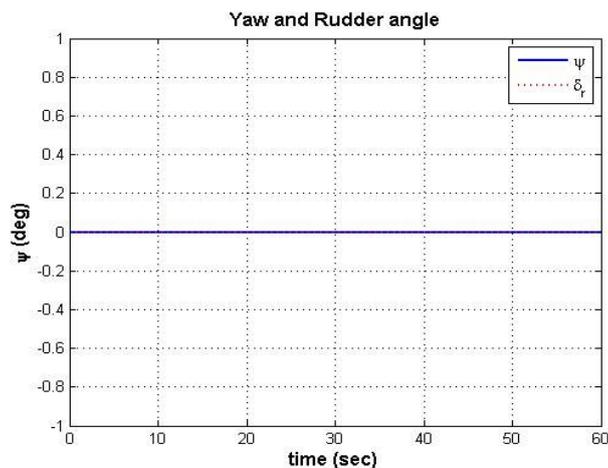


Fig. 5. Yaw angle and rudder angle

2) 수평 선회

선회 성능을 확인하기 위한 수평 선회 시뮬레이션을 실시하였다. 정지 상태에서 타각을 30° 로 유지하여 60초 동안 실시하였으며 추진기 추력은 동일하게 40%로 실시하였다. 초기 속도가 0이므로 타에 작용하는 힘이 적어 선회 반경이 조금 작은 경향을 보이다가 등속이 되면 일정한 반경으로 회전하는 것을 보인다. Fig. 6은 수평면에서의 선회 경로를 보이며 Fig. 7은 이때 수직타각과 선수동요각을 보이고 있으며 이때 선회 반경은 3.5m이다.

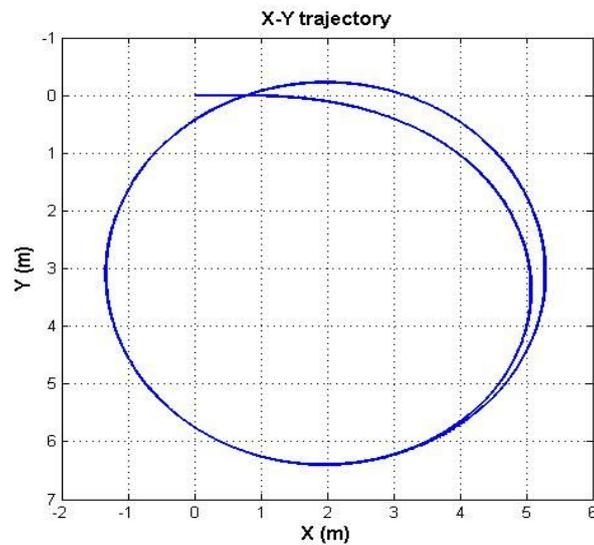


Fig. 6. Trajectory in horizontal plane

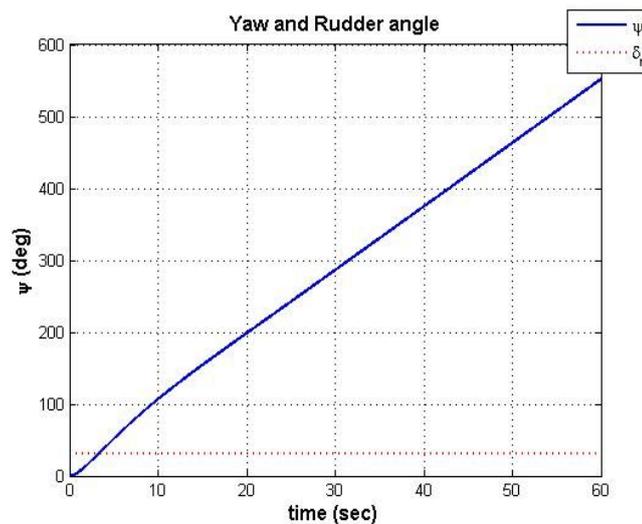


Fig. 7. Yaw angle and rudder angle

3) 수평 지그재그

타력에 의한 방향전환 성능을 파악하기 위하여 $-30^{\circ}/30^{\circ}$ 지그재그 시뮬레이션을 실시하였다. Fig 8과 같은 이동 궤적을 보이고 있으며 방향을 전환하는 거리는 2.3m 가량이였다. Fig. 9의 선수동요각을 보면 5° 가량의 오버슈트를 보이고 있으며 -30° 에서 30° 로 전환하는데 10초가량이 소요되는 운동특성을 보였다.

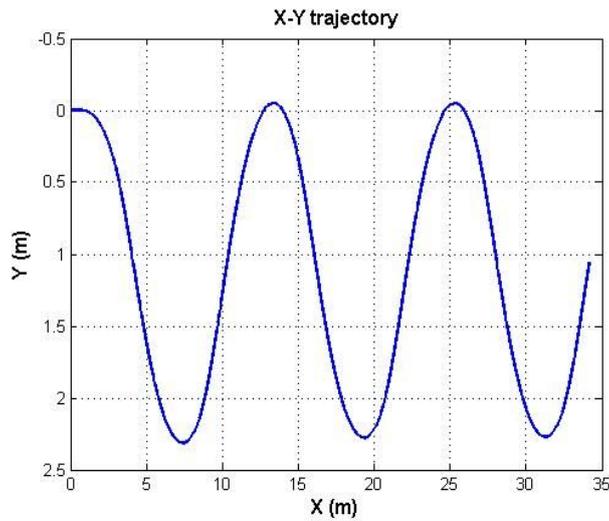


Fig. 8. Trajectory in horizontal plane

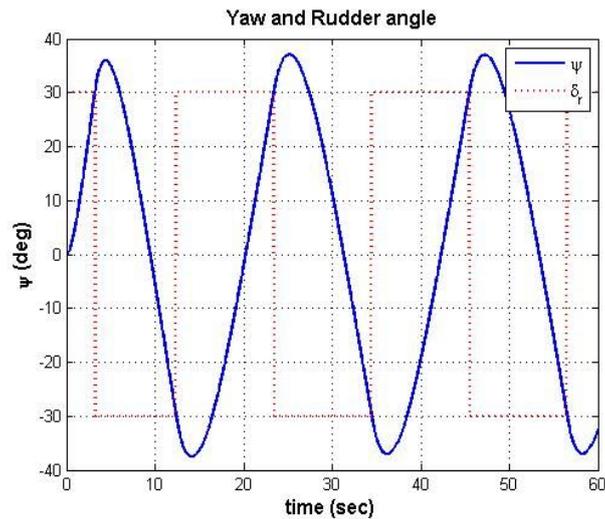


Fig. 9. Yaw angle and rudder angle

2.4 제어기 설계

만타형 무인잠수정은 해양의 열악한 환경 하에서 자율항주 하면서 임무를 완수하고 모션으로 회귀해야 하는 목적을 갖고 있다. 이러한 수중에서의 무인잠수정의 동적 거동은 비선형적인 요소와 연성운동이 발생하기 때문에 자세 또는 위치를 제어하기가 매우 어려운 시스템이다. 무인잠수정의 제어를 위하여 고전적인 제어를 이용하는 경우에는 잠수정의 운동특성을 정확히 파악하고 시스템의 모든 파라미터를 실험과 이론 계산으로 추정하여 결정하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 계측된 유체력계수와 파라미터를 이용하였으며 계수의 계측은 참고문헌 [5][6]을 참조하였다. 잠수정의 자율항주를 위한 경로를 제어하기 위해서 PID 제어기를 설계하여 수심과 방향제어에 각각 적용하였다.

PID 제어는 제어 시스템에서 가장 널리 사용되는 제어방식이다. 이는 비례(proportional, P)제어 동작, 적분(integral, I)제어 동작 그리고 미분(differential, D)제어 동작으로 이루어진다. 비례제어 동작에서는 비례제어 게인이 클수록 편차는 줄어드나 대신 오버슈트(overshoot)가 커지게 되고 게인이 너무 커지면 시스템이 불안정해질 수 있다. 적분제어 동작에서는 정상상태 편차를 0으로 만들어주는 효과가 있지만 시스템의 차수(system order)가 증가하게 되고, 이에 따라 반응속도가 느려지는 단점이 있다. 미분제어 동작은 시스템의 안정성을 높이는 역할을 하여, 오버슈트를 감소시키고 과도 응답을 좋게 하는 효과가 있다. 그러나 시스템에 잡음성분이 있을 경우 제어입력에 나쁜 영향을 미치는 단점이 있다. 따라서 적절한 형태의 PID 제어기의 설계가 필요하며 일반적인 PID 제어기의 동작은 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

여기서, $u(t)$ 는 입력함수, $e(t)$ 는 오차함수, K_p 는 비례제어 게인, K_i 는 적분제어 게인, K_d 는 미분제어 게인을 나타낸다.

만타형 무인잠수정의 수심과 방향을 제어하기 위하여 위의 PID 제어 기법을

이용하여 각각의 수심제어기와 방향제어기를 설계하였다.

2.4.1 수심제어

무인잠수정이 원하는 수심을 유지할 수 있도록 하기 위해서 PID 제어 이론을 이용하여 제어기를 설계하도록 한다. 잠수정의 수심방향 운동을 지배적으로 나타내는 변수들은 잠수정의 수심위치와 피치방향 운동이다.

만약 잠수정의 수심방향의 속도가 느리다고 한다면 미분제어 동작을 무시하고 단지 수심 오차에 대한 비례제어만을 사용할 수 있으며 잠수정의 수심제어기는 다음과 같다.

$$\delta_s(t) = K_{pz}(z_d - z) \quad (10)$$

여기서, K_{pz} 는 수심오차에 대한 비례제어 게인, z_d 는 목표수심이며 z 는 현재 수심을 나타낸다.

수심제어에 사용된 제어기의 게인은 시행착오 방법을 통하여 무인잠수정이 적절한 응답을 보이는 값을 선정하였으며 제어입력 값은 승강타가 가질 수 있는 각도의 범위 내에 존재하도록 한계 값을 설정하여 사용하였다.

2.4.2 방향제어

무인잠수정이 원하는 방향을 유지할 수 있도록 하기 위해서 수심제어와 마찬가지로 PID 제어 이론을 이용하여 제어기를 설계하도록 한다. 잠수정의 운동 중에서 잠수정의 진행방향을 결정하는 지배적인 변수는 잠수정의 요(yaw)운동을 나타내는 ψ 이다.

따라서 잠수정의 방향제어를 위해서 선수동요각도 오차에 대한 PD제어를 사용하도록 하였으며 원하는 목표방향각 ψ_d 을 설정하면 선미의 수직타를 조정하여 목표방향각을 추종할 수 있도록 다음과 같은 방향제어 법칙을 설계하였다.

$$\delta_r(t) = K_{p\psi}(\psi_d - \psi) + K_{dr}(r_d - r) \quad (11)$$

여기서, K_{ψ} , K_{dr} 는 각각 선수동요각도 오차에 대한 비례제어 게인, 미분제어 게인을 나타낸다.

방향제어에 사용된 제어기의 게인은 마찬가지로 시행착오 방법을 통하여 무인 잠수정이 적절한 응답을 보이는 값을 선정하였으며 제어입력 값은 수직타가 가질 수 있는 각도의 범위 내에 존재하도록 한계 값을 설정하여 사용하였다.

2.5 제어성능 해석

잠수정 개발의 최종 목표인 자율항주를 실행시키기 위하여 수심제어, 방향도제어 시뮬레이션을 실시하였다. 이를 이용하여 실제 제작된 잠수정에 제어기를 적용하여 제어 실험을 실시하고 최종적으로 자율항주 시험을 실행할 것이다.

2.5.1 제어 시뮬레이션 프로그램

제어성능을 확인하기 위한 프로그램은 운동성능 시뮬레이션과 같은 Matlab의 Simulink를 이용하여 만들어 프로그래밍 되었다. 앞 절에서 설계한 제어기를 적용하였으며 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교하는 것을 목표로 실시하였다. Fig. 10은 제어프로그램의 모습이다.

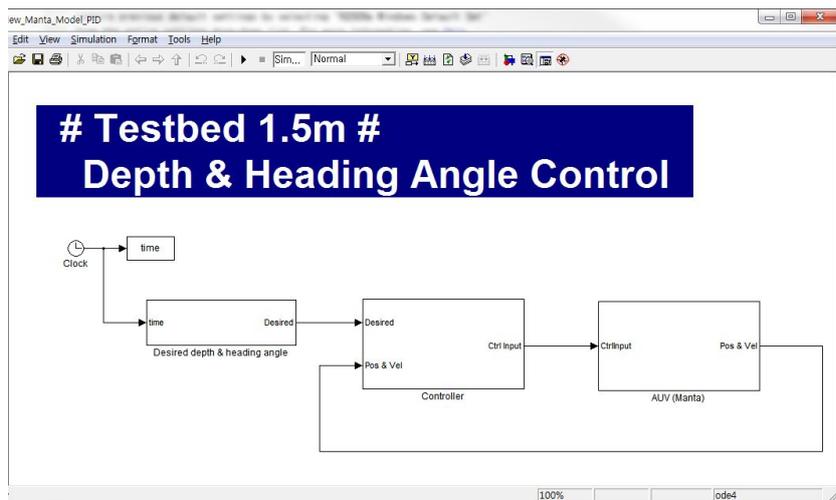


Fig. 10. Simulation program using Simulink for Manta-type UUV

2.5.2 제어성능 시뮬레이션

1) 수심제어

수심제어는 P제어기를 사용하였으며 K_{pz} 게인은 50으로 설정하여 실시하였다. 목표수심 0.5m의 결과는 Figs. 11-14이며 잠수정의 0.5m까지 도달하는데 9.7초가량 소요되었으며 오버슈트 없이 목표수심을 잘 유지하는 결과를 보였다.

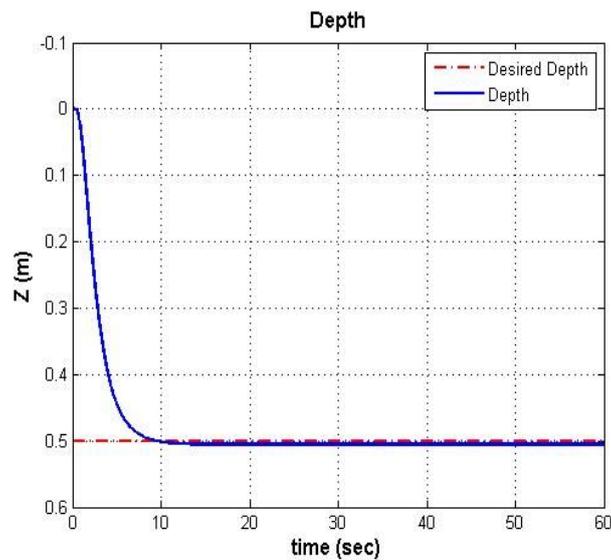


Fig. 11. Trajectory in vertical plane

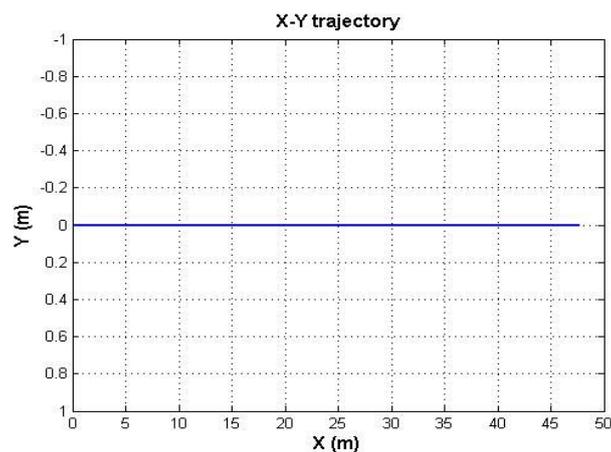


Fig. 12. Trajectory in horizontal plane

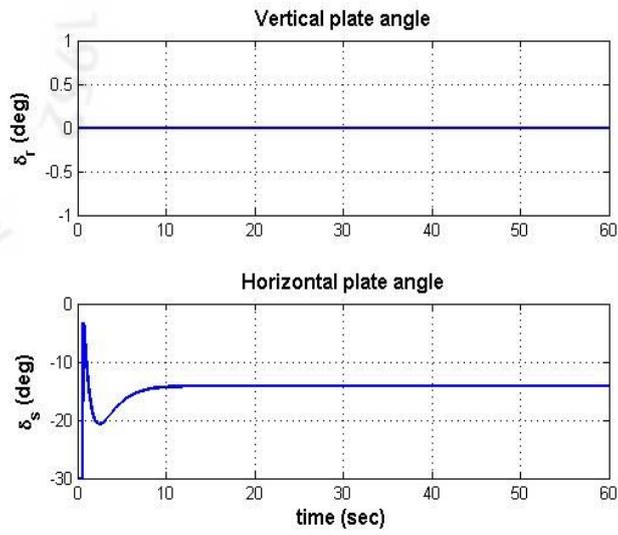


Fig. 13. Vertical and horizontal plate angle

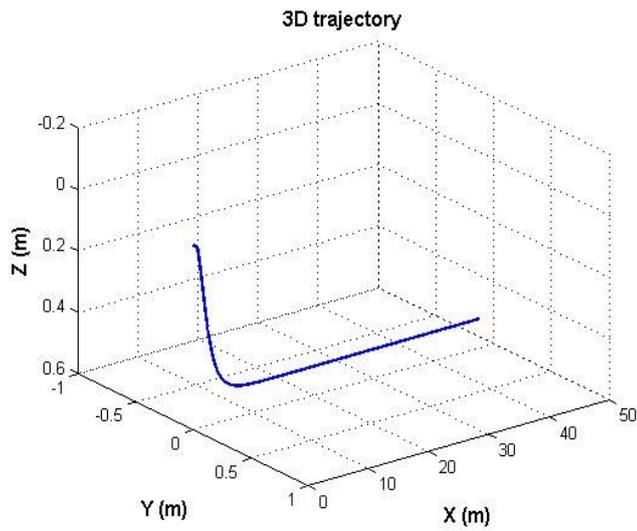


Fig. 14. Trajectory in 3D plane

2) 방향제어

잠수정의 방향제어 시뮬레이션은 0° 에서 출발하여 목표 각도를 30° 로 유지하도록 설정하였으며 $K_{p\psi}$ 게인은 50 K_{pr} 게인은 30으로 하여 60초간 시뮬레이션 하였다. Fig. 15는 방향제어시 수평면 경로를 보이고 있으며 0° 에서 30° 각도로 수렴하는데 6.5초가량 소요됐다.

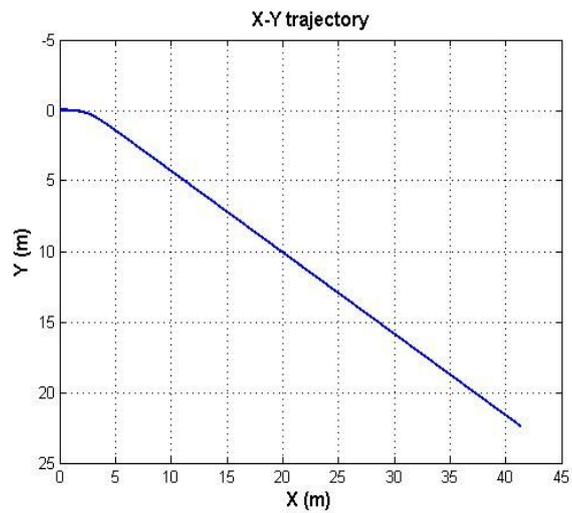


Fig. 15. Trajectory in horizontal plane

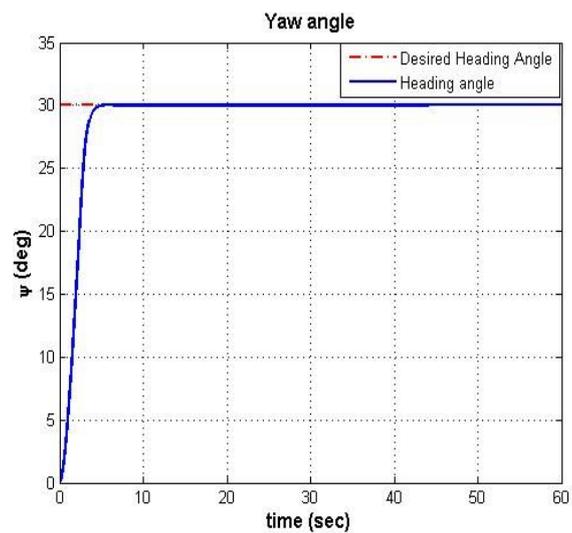


Fig. 16. Heading control result

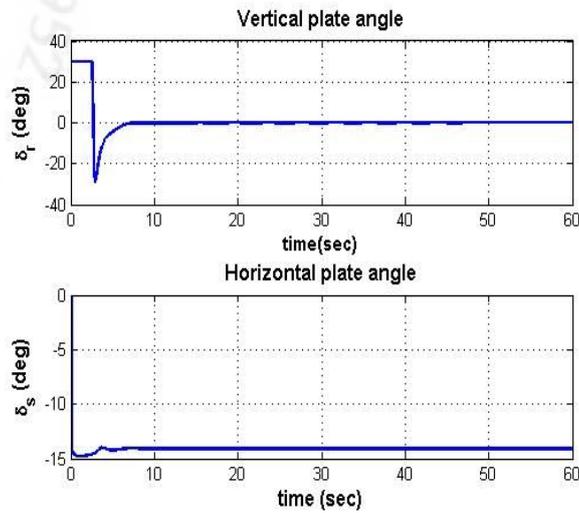


Fig. 17. Vertical and horizontal plate angle

3) 자율 경로주행

Fig. 18의 그래프는 잠수정의 최종 목표인 자율 경로주행에 대한 시뮬레이션의 수평 경로를 나타낸다. 자율 경로주행에 대한 목표좌표는 (0, 0)m, (0, 20)m, (20, 20)m, (20, 0)m으로 정하였으며 목표방향각은 수평면에 대한 가시선(LOS, Line of Sight)방법을 이용하며 방향 및 수심제어는 설계된 PD제어기를 사용하였다. 가시선 방법의 식은 다음과 같다. 시뮬레이션에서 잠수정의 이동궤적은 Fig. 18과 같으며 Fig. 19는 자율 경로주행시에 목표방향과 잠수정 선체의 선수동요각과 목표각을 나타내고 있다.

$$\psi_d(t) = \tan^{-1} \left[\frac{Y_k - Y(t)}{X_k - X(t)} \right] \quad \text{at} \quad \begin{cases} [X(t), Y(t), Z(t)] = \text{잠수정의 위치} \\ [X_k, Y_k, Z_k] = \text{경유점의 위치} \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho^2(t) = [X_k - X(t)]^2 + [Y_k - Y(t)]^2 + \lambda [Z_k - Z(t)]^2 < \rho_c^2$$

식 12에서 ψ_d 는 목표각을 나타내며 ρ_c 는 목표좌표의 반경을 나타낸다. 잠수정의 목표좌표의 반경을 잘 설정하기 위해서 잠수정의 운동성능을 파악하는 것이 중요하다. 반경을 잘못 설정하면 다음 좌표로 가지 못하고 계속해서 하나의 좌표

를 중심으로 계속해서 운항하게 된다.

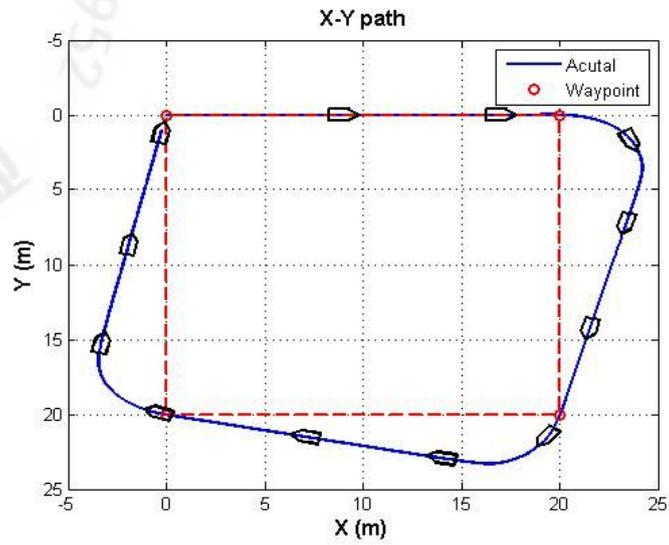


Fig. 18. Trajectory in horizontal plane

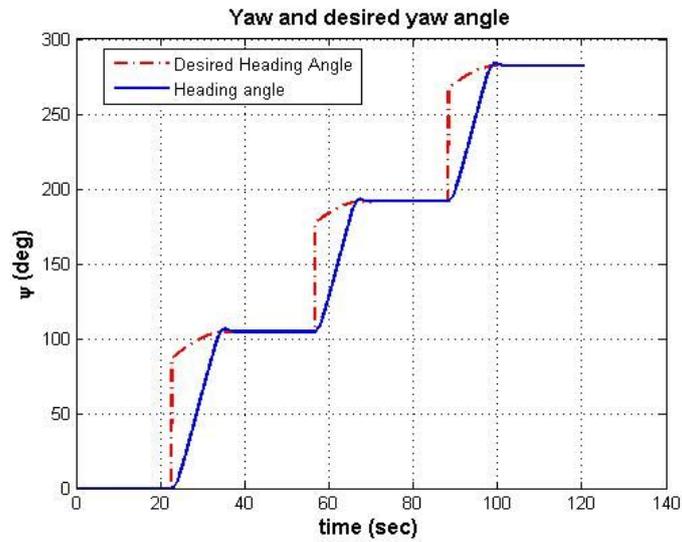


Fig. 19. Yaw and desired yaw angle

3. 만타형 잠수정 설계

3.1 설계 목표

잠수정의 설계에서 사용목적에 정하는 것은 매우 중요하다. 사용목적에 따라서 형상 및 작업수심, 주행속도, 적재하중 등의 결정된다. 또한 목표 수행에 적합한 센서와 추진기 등도 결정되게 된다. 만타형 무인잠수정은 ADD의 지원 하에 연구 중인 만타형상의 잠수정 모델에 대한 기초연구를 목적으로 설계되었다. 만타 잠수정 모델에 대한 형상과 개념은 Fig. 20과 같으며 제원은 Table 2와 같다.

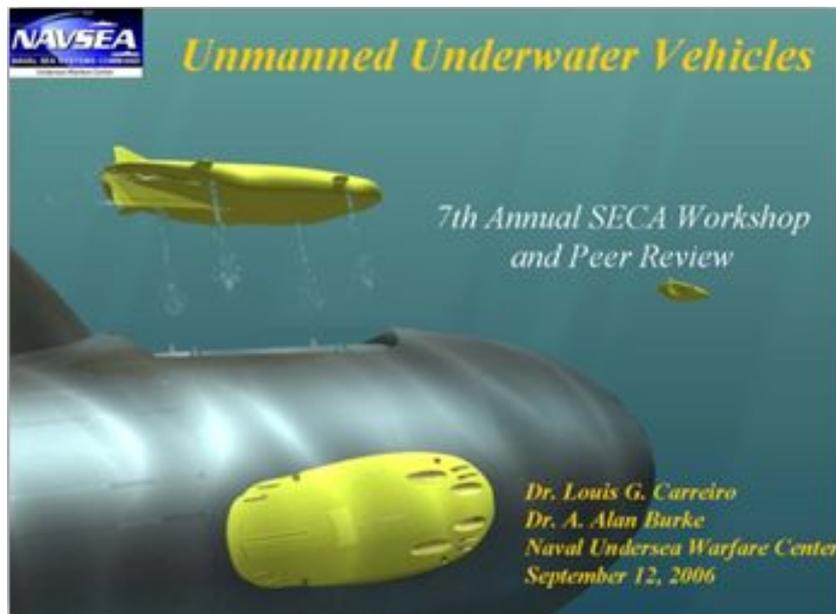


Fig. 20. Basic concept of Manta-type UUV[NAVSEA]

Table 2. Actual dimension of Manta-type UUV

Item	Dimension
Length	L = 12.0 m
Breadth	B = 4.4 m
Height	H = 1.2 m
Disp. vol.	$\nabla = 31.88 \text{ m}^3$

본 연구의 목적은 원형 모델(길이 12m)의 개발을 위한 기초적인 운동성능 검증과 제어실험을 위한 테스트베드로서 만타형 무인잠수정을 제작하여 시험하는데 있다. 테스트 베드의 사이즈는 운동성능을 계측하기 위한 센서의 탑재공간과 4인 이하의 인원으로 실험이 가능하도록 1.5m로 설계되었으며 작업수심은 실험해역의 최대 수심을 고려하여 10m로 설계 하였다. 또한 최대 운용속도는 1.5m/s로 설계 하였으며 350 Watt의 추진기 한 대를 사용하였다. 또한 방향과 수심을 제어하기 위하여 서보모터 2개를 이용하였다. 시스템을 운용하기 위한 소형의 PC를 탑재하여 DVL, 컴퍼스, 압력센서, GPS 등의 센서의 데이터를 처리하여 시스템을 구축하였다. 만타형 무인잠수정의 사양은 Table 3와 같다.

Table 3. Principal dimensions of Manta-type UUV

Parameter	Specification
선형	Manta Type
제원	1.5m(L)×0.55m(B)×0.28m(H)
중량	40kgf
작업수심	20m(max)
최고속도	1.5m/s
추진기	350watt × 1개
제어모드	3자유도 운동제어
제어보드	On-board PC NI USB-6009
항해센서	DVL(Doppler Velocity Log) Magnetic compass Pressure Sensor GPS
배터리	25.7V-6.6AH 리튬폴리머 × 5EA
통신	RS-232, WiFi

3.2 만타형 잠수정 제작

본 연구에서 제작한 만타형 무인잠수정의 제작된 모습은 Figs. 21-23와 같다. 외형은 만타 모형 이며 원형 만타의 1/8스케일로 축소된 모습이다. 길이와 너비는 축소된 스케일의 사이즈와 같으나 높이는 1/8스케일의 높이 보다 1.5배 높게 제작 되었다. 이는 DVL센서를 탑재하기위해서 변경 하였다. 선미 부분에 추진기

한 대가 설치되어 있으며 수직타 1개와 수평타 4개가 설치되어 있다. 수직타의 경우 한 대의 서보모터를 통해 구동되며 수평타의 경우도 한 개의 서보모터로 4개의 수평타를 동시에 제어하게 된다. 추진기와 타를 통해서 Surge, Pitch, Yaw의 3자유도 운동이 가능하게 된다.

자율운항을 위한 시스템은 두 개의 내압용기에 들어있다. 중앙의 원형 내압용기에는 소형 PC, 계측장치 및 배터리가 들어있다. 선미부의 사각 내압용기에는 수평타와 수직타를 구동하기 위한 서보모터가 들어있다. Fig. 24는 만타형 무인잠수정의 전체 시스템을 보이고 있다.

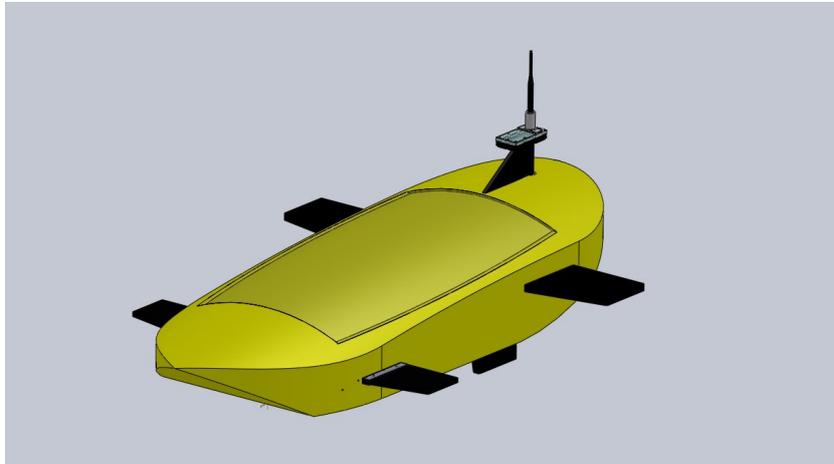


Fig. 21. Overview of Manta-type UUV

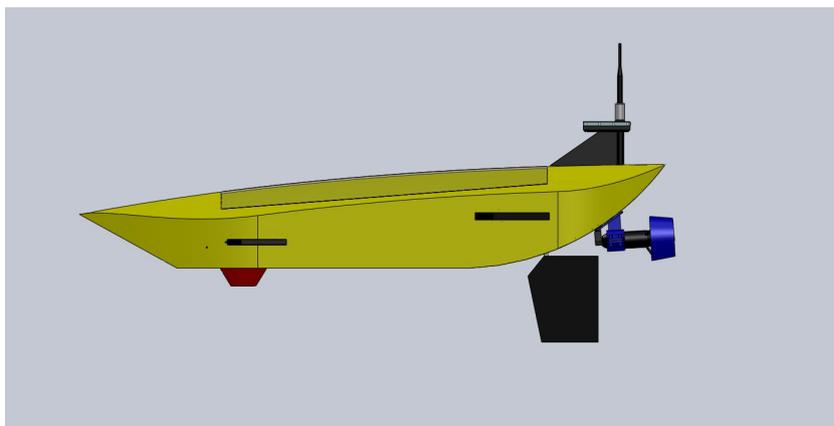


Fig. 22. Side view of Manta-type UUV

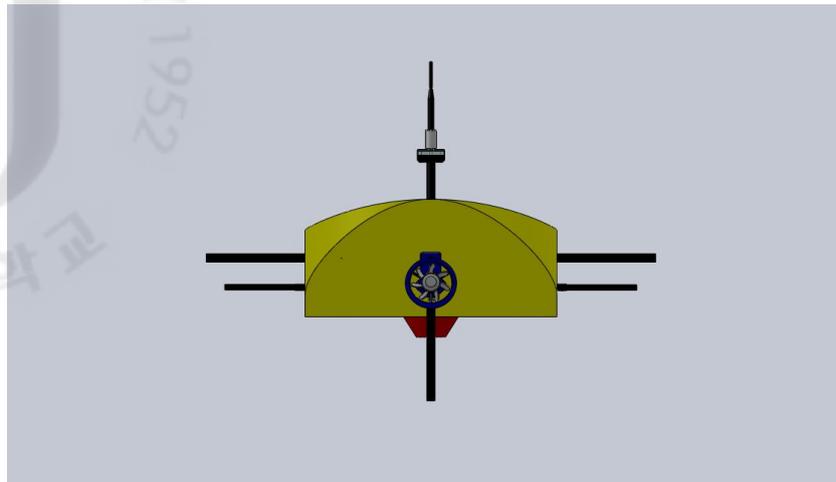


Fig. 23. Back view of Manta-type UUV

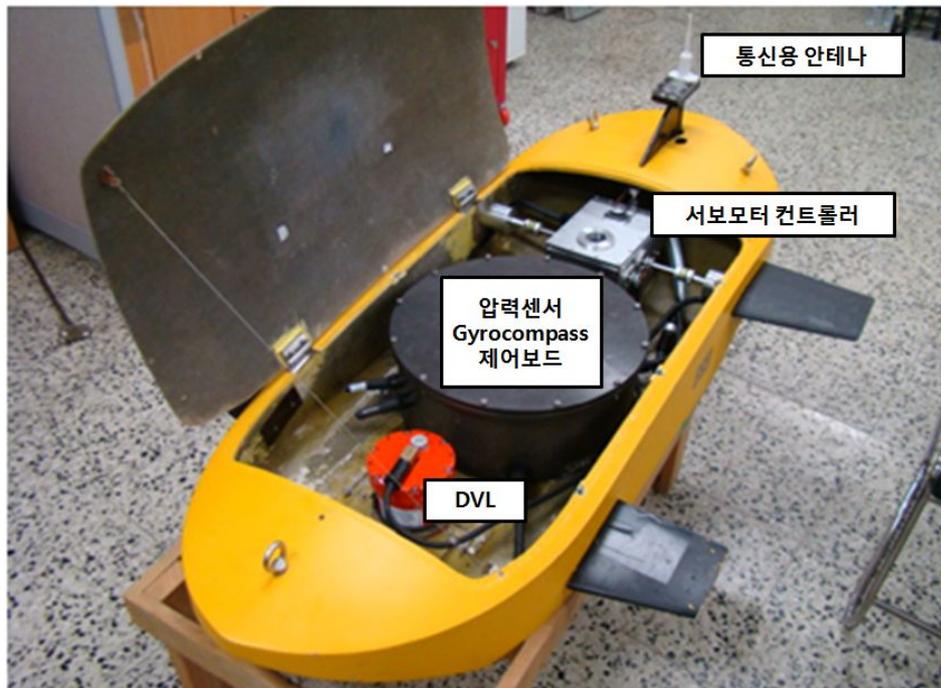


Fig. 24. General arrangement of Manta-type UUV

3.2.1 선형(Hull shape)

무인 잠수정의 선형은 크게 실린더(Cylinder type), 유선형(Hydro dynamic type), 플랫피쉬형(Flatfish type)으로 분류된다. 만타형 무인잠수정의 선형은 플랫피쉬형에 속하며 특별히 Manta형상으로 설계되었다. 이는 새로운 형태의 무인

잠수정에 대한 기초 연구를 위한 선형이다. Fig. 25는 제작된 만타형 무인잠수정의 선형이며 제원은 1.5m(L) × 0.55m(B) × 0.28m(H) 이며 프레임의 재질은 FRP로 제작되었다. 프레임 내부는 물이 들어오는 구조이며 제어시스템 및 기구부는 두 개의 내압용기에 의해서 방수된다.



Fig. 25. Hull shape

3.2.2 부력재(Buoyancy material)

만타형 무인잠수정의 프레임은 FRP이며 비중은 1.4정도를 가진다. 또한 내부에는 DVL과 두 개의 내압용기가 있어 음성부력을 가지게 되며 이를 보상하기 위해서 부력재를 사용하게 된다. 부력재는 압축 스티로폼으로 제작하였으며 부력중심과 중력 중심의 거리를 최대한 멀리하여 안정성을 증가시키기 위해 상단에 부착하였다. 본 연구의 만타형 무인잠수정은 설계 수심이 10m이며 압축 스티로폼을 사용해도 부력에 큰 문제는 없다.

3.2.3 내압용기 (Pressure housing)

무인 잠수정의 운용을 위해서는 전장시스템의 탑재가 필수적이다. 이를 위해서 대기압을 유지하고 수밀(Water proof)을 유지하며 각종 센서 및 배터리 등을

탑재할 수 있는 내압용기가 필수적이다. 내압용기의 공간은 한정적이기 때문에 설계 시 탑재할 장비의 구성 및 배치 등을 고려한 설계가 필수적이다. 만타형 무인잠수정의 내압용기는 두 개가 제작되었다. 원형 내압용기에는 각종 센서 및 배터리가 들어가 있으며 무인잠수정에서 가장 중요한 제어보드가 들어가 있다. 원형 내압용기는 수중 커넥터를 이용하여 DVL, 통신용 안테나, 추진기, 서보모터 하우징등과 연결되어 있으며 설계는 Fig. 26과 같다. 사각 내압용기는 서보모터 두 개가 들어 있으며 수평타와 수직타를 제어하게 된다. 서보용 내압용기를 따로 설계한 이유는 서보모터의 기구부는 축이 관통되어 있으며 오링과 구리스를 통해서 방수가 되는데 이 부분이 마모가 되면 물이 쉘 위험이 있기 때문에 가장 중요한 전장부분과 분리를 하여 Fig. 27과 같이 설계 하였다. Table 4은 원형 하우징과 사각 하우징의 제원이다.

Table 4. Specification of pressure housing

Parameter		Specification
Cylinder type	Size	400(∅) mm x 150 mm
	Weight	11.45kg
Rectangular type	Size	150mm x 210mm x 75 mm
	Weight	2.93kg

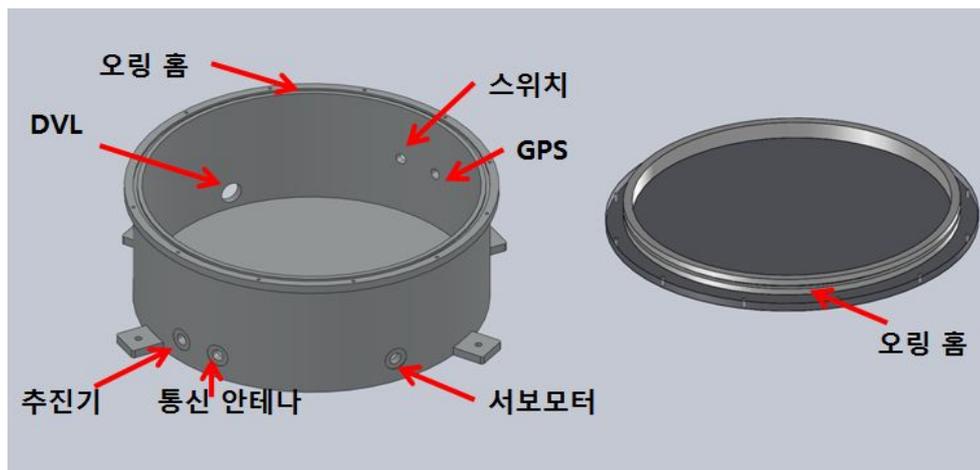


Fig. 26. Electronic pressure housing

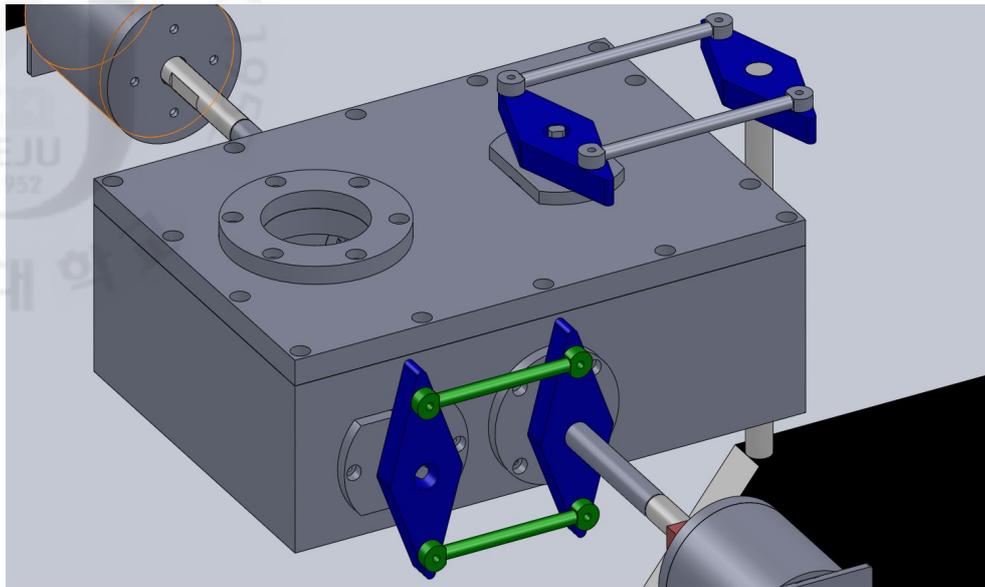


Fig. 27. Servo pressure housing

3.2.4 추진기(thruster)

만타형 무인잠수정의 추진기는 Tecnydyne사의 Model 300이 사용되었다. 설치된 추진기의 위치는 선미 중앙이며 Fig. 29은 설치된 추진기의 모습이다. 추진기는 Table 5와 같이 입력전압은 24~150V이며 모터드라이버는 독립된 12V의 전압이 입력되고, $\pm 5V$ 아날로그 제어명령으로 전·후진 추력을 발생한다. 추진기의 용량은 최대 350watt이며 전진 추력 8.2kgf 후진 추력 3.6kgf의 추력을 갖는다.

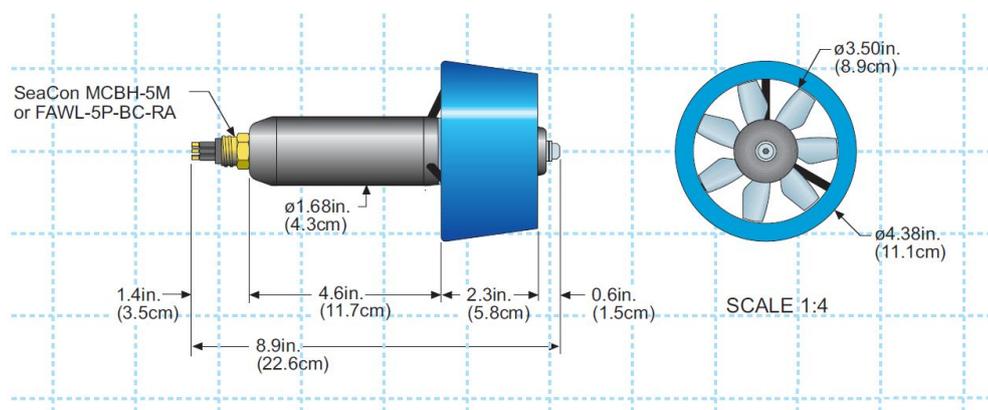


Fig. 28. Floor plan of Tecnydyne thruster Model 300



Fig. 29. Thruster mounting

Table 5. Specification of Tecadyne thruster model 300

Parameter	Specification
Output Thrust	Forward 8.2 kgf Reverse 3.6 kgf
Input	24~150V DC Power Ground +12V Instrument Power +12V Instrument Ground -5 ~ +5 V Command
Weight	1.0 kg in air 0.7 kg in water
Depth Rating	850 m

3.2.5 수직타와 수평타

수직타와 수평타의 구동에는 ROBOTIS사의 Dynamixel EX-106+ 서보모터가 사용되었다. Fig. 30는 서보모터의 외형이며 Table 6는 서보모터의 제원이다. 최소 제어각은 0.06°, 최대 토크는 107kgf·cm이며 12~18.5V의 전압으로 구동된다. 만타의 타는 선체에 비해서 매우 큰 사이즈이며 이를 동작시키기 위해서 100kgf·cm이상의 서보모터를 선정하였다. 서보모터의 구동을 위하여 사각하우징

을 제작하여 구동부를 수밀 하였다. Fig. 31은 수평타의 구동부의 도면으로 한 개의 서보모터 축과 4개의 타가 커플링 되어 있어서 동시에 같은 각도로 구동 된다. 이와 같이 동시에 4개의 타를 구동하여 수심방향 제어를 하는 이유는 선미 부분의 타만을 이용하면 Pitch각이 증가하면서 수심방향으로 잠수정이 내려가게 되며 Pitch각이 -20° 이상이 되면 제어가 안 되며 급속히 수심방향으로 잠수정이 떨어지는 현상을 실험을 통해서 파악하였으며 이를 방지하기 위한 구조로 설계 하였다. Fig. 32는 수직타 구동부의 도면이며 서보모터는 한 개의 수직타를 구동하게 된다.



Fig. 30. Digital servo EX-106+

Table 6. Specification of digital servo EX-106+

Parameter	Specification
Weight	154g
Dimension	40.1mm x 65.3mm x 50.1mm
Resolution	0.06°
Gear Reduction Ratio	184:1
Stall Torque	107kgf.cm(at 18.5V 7A)
No load speed	91rpm (at 18.5V)
Running Degree	0° ~ 251° Endless Turn
Voltage	12 ~ 18.5V
Protocol Type	RS485 (8bit,1stop, No Parity)
Communication Speed	7343bps ~ 1 Mbps

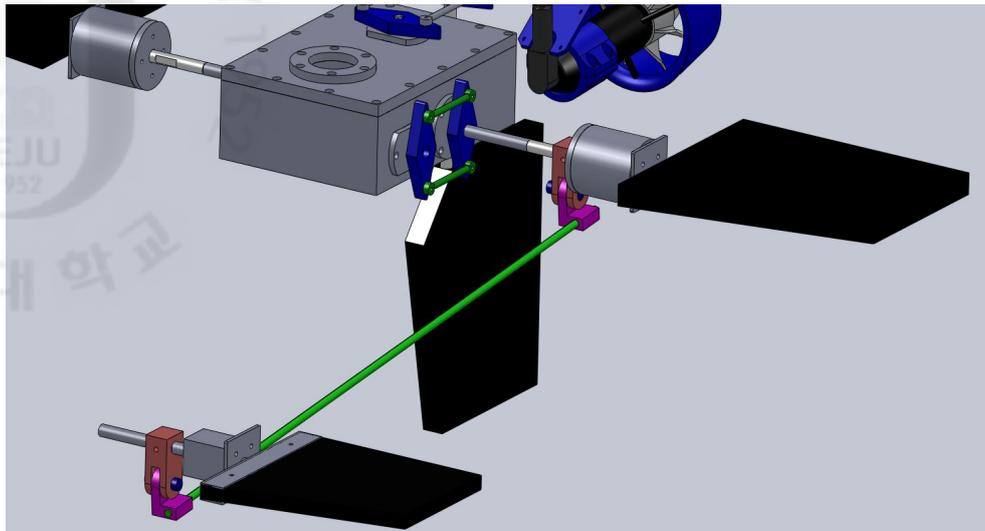


Fig. 31. Servo motor and horizontal control Fin

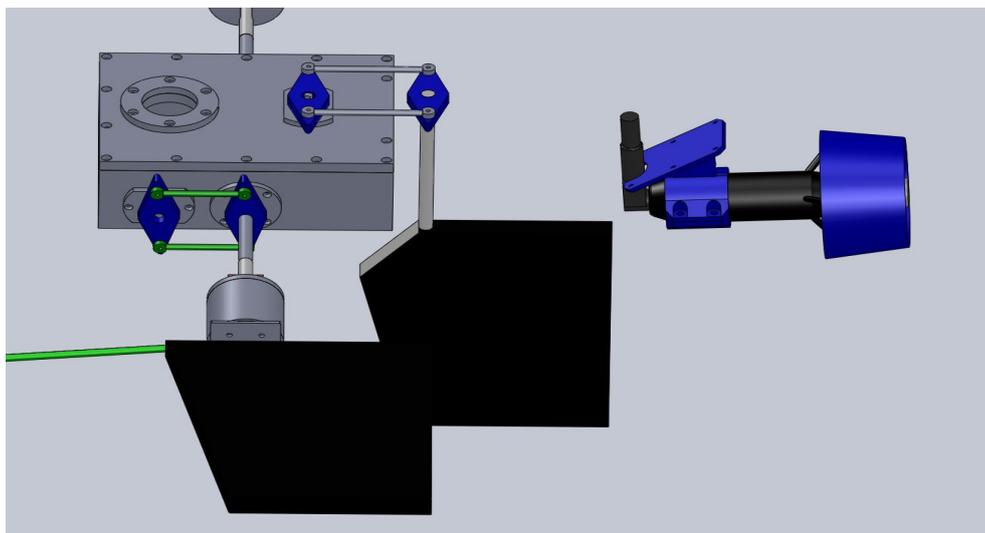


Fig. 32 Servo motor and vertical control Fin

3.3 계측 및 제어시스템

수중에서는 GPS 신호를 사용할 수 없기 때문에 잠수정의 제어를 위해서는 DVL(3축 속도계), Gyrocompass(3축 각도계), IMU(3축 가속도계), 압력센서와 같은 여러 가지 센서가 필수적이다. 이들 센서의 출력 값들에 대한 정보들을 적절히 혼합하여 잠수정의 제어에 이용하게 된다.

수심을 측정하기 위하여 압력센서가 사용 되었으며 만타형 무인잠수정의 경로

를 계산하기 위하여 DVL(Doppler Velocity Log)와 Gyrocompass센서가 사용되었다. 압력센서는 Green Sensor 사의 A10모델로 0~10m 수심을 4~20mA의 전류 값으로 출력한다. AD 보드로는 전류값에 저항단을 연결하여 1~5V의 전압 값으로 수심정보를 얻는다. Gyrocompass는 TCM3센서를 사용하였으며 Roll, Pitch, Yaw각을 출력으로 제공한다. DVL은 LinkQuest 사의 NavQuest 600 Micro DVL모델을 사용하였으며 작동 주파수는 600kHz이며 Surge, Sway, Heave속도를 계측한다.

Fig. 33은 만타형 무인잠수정의 시스템흐름을 블록다이어그램으로 나타낸다. 블록선도를 보면 One Board PC에 연결된 DAQ Board를 압력센서 데이터를 계측하며 아날로그 출력을 이용해서 추진기를 제어한다. 또한 PC의 RS-232통신을 이용해서 DVL, TCM3, GPS 센서 데이터를 계측하며 서보모터를 구동한다. Figs. 34와 35는 PC와 DAQ Board이며 Tables 7과 8은 PC와 DAQ Board의 사양을 나타낸다.

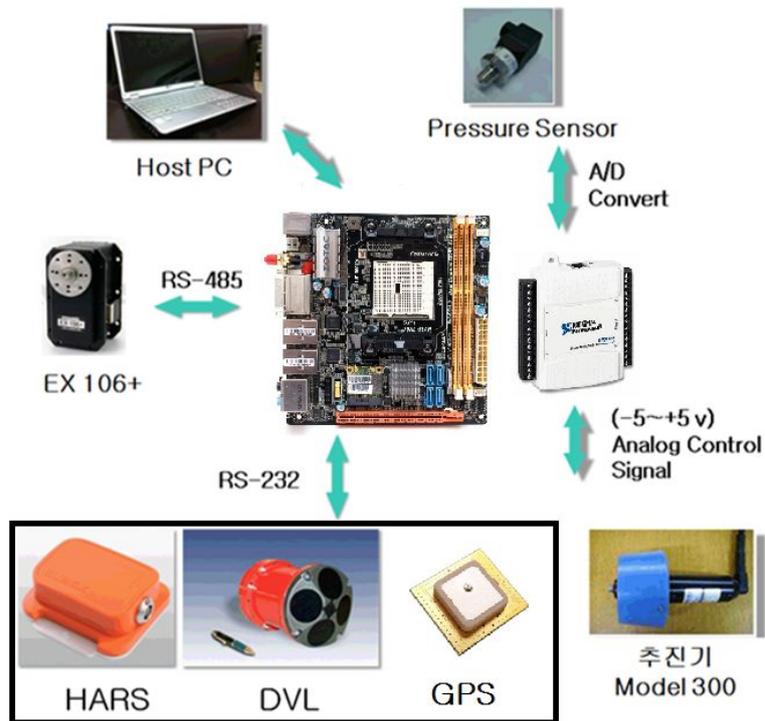


Fig. 33. Block diagram of system for Manta-type UUV



Fig. 34. On-board PC(Zotec Geforce 9400-ITX)

Table 7. Specification of on-board PC

Parameter	Specification
Dimension	150mm x 150mm x 50mm
Clock Frequency	2.8GHz
Thermal design power	60 Watt
Storage	64GB SSD



Fig. 35. NI USB-6009(DAQ Board)

Table 8. Specification of NI USB-6009(DAQ Board)

Parameter	Specification
Dimension	85.1mm x 81.8mm x 23.1mm
Analog Input	4 channel(14 bits resolution, -10~10V)
Analog Output	2 channel(12 bits resolution, 0~5V)
Digital Output	12 channel(0~5)

제어시스템의 프로그램은 National Instrument사의 Labview 8.6을 사용하여 프로그래밍 되었다. 전체 시스템의 Sampling rate는 while loop에 200ms의 delay를 주어 5Hz 속도로 센서 데이터를 계측하도록 설정하였다. 이는 실험 시 최대 0.7m/s속도로 주행할 때 최대 선회 반경이 4m이고 5Hz의 Sampling rate로 이동체적을 분석하는데 충분함을 실험을 통해서 확인하여 설정하였다.

압력센서의 출력값은 아날로그 데이터이며 DAQ 데이터는 Moving average filter를 이용하여 필터링 하였다. 대부분의 프로그램은 Labview의 SubVI기능을 이용하여 모듈화 하였으며 전체 프로그램은 Figs. 36-38과 같다.

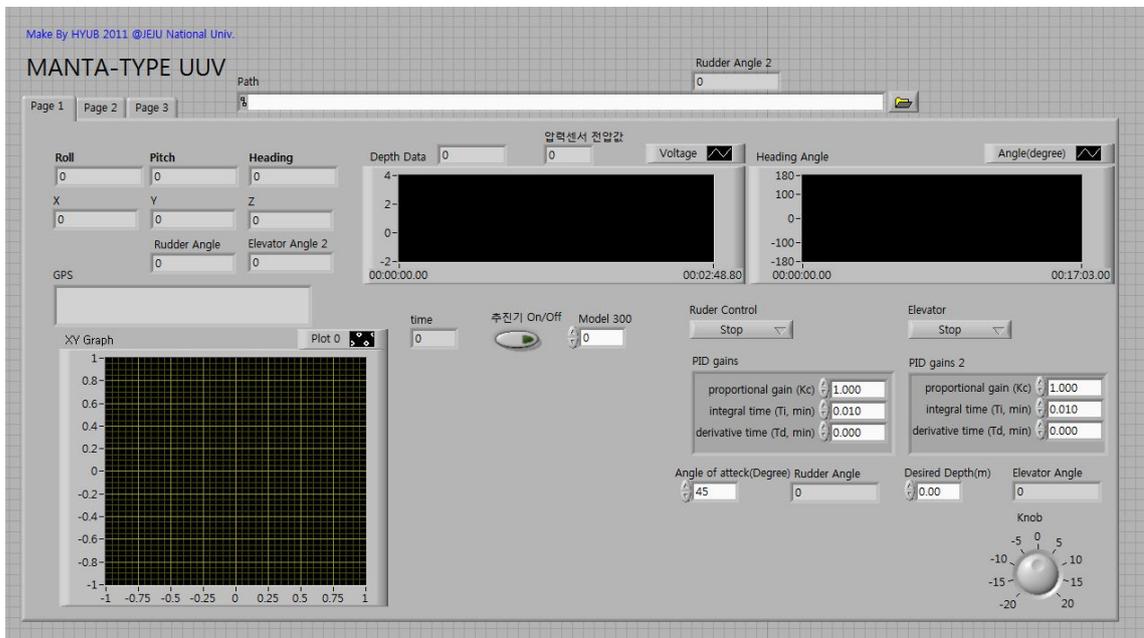


Fig. 36. Control program(Labview print panel)

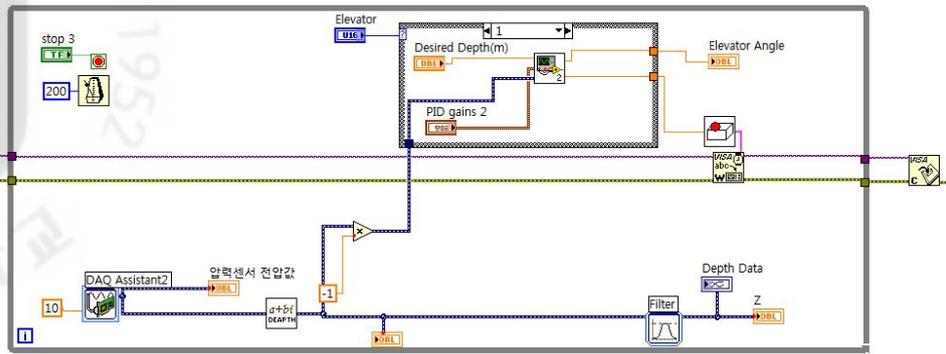


Fig. 37. Vertical motion control program

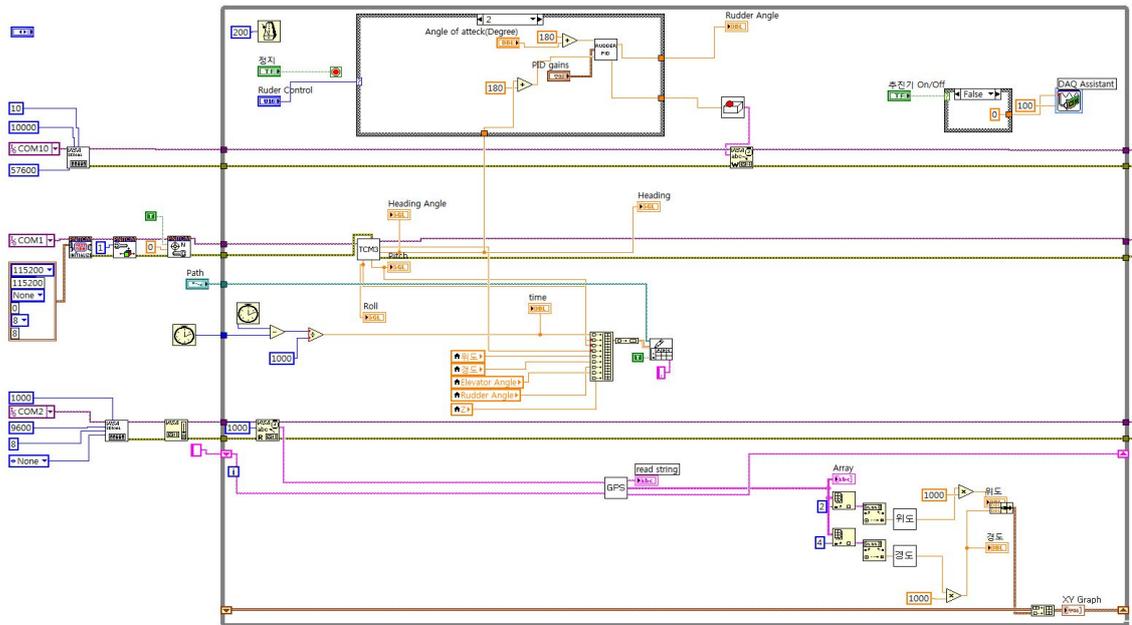


Fig. 38. Horizontal motion control program

3.4 센서 및 전원

만타형 무인잠수정의 시스템에서 계측시스템을 구성할 때 가장 중요한 것은 센서의 선택이다. 앞의 절에서도 센서의 선정의 중요성을 설명하였다. 이번 절에서는 만타형 무인잠수정에 탑재된 센서에 대한 사양 및 기능을 명시한다.

3.4.1 DVL(Doppler Velocity Log)

수중에서 잠수정의 속도를 측정하는 센서 중 하나이다. 3축의 속도 값을 도플러 효과에 의해서 최대 20Hz의 속도로 측정하며 측정된 값을 프로그램을 이용하여 적분하고 x, y 변위를 구하게 된다. Fig. 39는 만타형 무인잠수정에 탑재된 DVL이며 Table 9는 주요 사양이다.



Fig. 39. NavQuest600 Micro DVL

Table 9. Specification of DVL

Parameter	Specification
Weight	2.9kg(In Air)
	1.2kg(In Water)
Dimension	126(∅)mm x 170mm
Frequency	600kHz
Accuracy	1%, ±1mm/s
Altitude	110m(Max)
	0.3m(Min)
Maximum Velocity	± 20knots
Standard Depth	800m
Maximum Sampling Rate	20Hz
Power	80watts(Maximum Transmit)
	1.2watts(Receiver)
	2~5watts(Average Power Consumption)
Voltage	24 ±2V
Transducer	4 Beam Convex
Transducer Beam Angle	22°
Housing	Anodized Aluminum and plastics
Protocol Type	RS232 or RS485 (8bit,1stop, No Parity)

3.4.2 자이로 컴파스(Gyrocompass)

자이로 컴파스는 PNI사의 TCM3(Tilt Compensated 3-axis compass module) 센서를 사용하였다. 컴파스의 3축 각도값을 이용하여 Heading제어와 선체고정좌표계의 궤적을 지구고정좌표계로 변환하는데 이용하게 된다. 만타형 무인잠수정에 사용된 자이로 컴파스는 Fig. 40와 같으며 Table 10는 제원을 나타낸다.



Fig. 40. TCM3(Tilt compensated 3-axis compass module)

Table 10. Specifications of TCM3(Tilt compensated 3-axis compass module)

Parameter	Specification
Weight	12g
Dimension	35mm x 43mm x 13mm
Heading accuracy	0.5° @ < 70° of tilt 0.8° @ > 70° of tilt
Roll accuracy	0.2° for pitch < 65° 0.5° for pitch < 80° 1.0° for pitch < 86°
Pitch accuracy	0.2°
Sampling rate	20Hz (max)
Output formats	Binary High Performance Protocol
Power	3.6 to 5V
Protocol Type	RS232 or RS485 (8bit,1stop, No Parity)
Communication Rate	300 to 115200 baud

3.4.3 압력센서

수중에서 깊이를 가장 쉽게 계측할 수 있는 방법은 압력센서를 이용한 수심의 계측이다. 잠수정에서는 압력센서를 통해 압력 값을 계측하고 계측된 값을 이용

하여 수심방향의 제어를 하게 된다. 만타형 무인잠수정에 사용된 압력센서는 Fig. 41의 A-10 압력센서를 사용하였다. Table 11.에서 보이듯이 최대 1bar의 값을 계측할 수 있으며 이는 설계 시 작업수심이 10m로 설정되어 있어 선정하였다. 압력센서의 계측 범위가 너무 넓으면 출력범위가 1~5V 정도의 압력센서의 경우 작은 노이즈에도 큰 범위의 수심변화로 계측되어 제어하기 어려우며 필터 설계에도 많은 노력이 필요하기 때문에 작업수심에 맞는 센서 설정은 매우 중요하다.

Table 11. Specifications of pressure sensor

Parameter	Specification
Pressure ranges	1bar
Over pressure safety	2bar
Power	8~30V
Signal output	4~20mA
Accuracy	$\leq \pm 0.3\%$
Operating temperature	0~80°C



Fig. 41. Pressure sensor

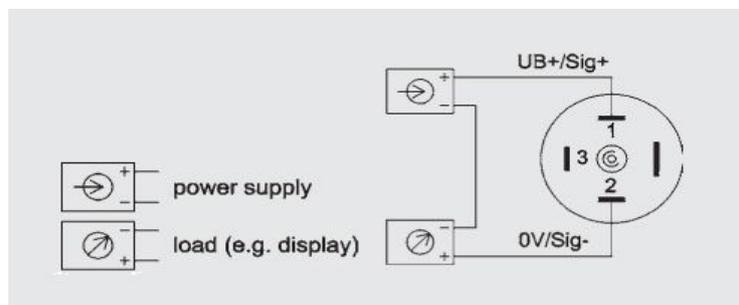


Fig. 42. Pin connection of pressure sensor

3.4.4 GPS(Global Positioning System)

GPS는 가장 적은 비용으로 수상, 육상 및 항공에서의 위치를 계측할 수 있는 센서이다. 또한 DVL이나 IMU센서같이 적분오차가 없으므로 본래 센서의 오차 범위 값으로 오차가 고정되어 먼 거리를 주행하는 무인잠수정에서 잠수 후 센서 값의 초기화 및 오차 값을 확인하는데 필수적인 센서이다. 만타형 무인잠수정에서는 Fig. 43와 Table 12와 같이 FGPMOPA1 GPS Module을 사용하였으며 센서에서 좌표 값은 5Hz의 Sampling rate로 계측하였다. 만타형 무인잠수정의 최대 운항속도는 1.5m/s이며 실험 시에는 보통 0.7m/s이하의 속도로 실험을 하게 되므로 5Hz의 Sampling rate로 이동궤적을 나타내기에 충분하다.



Fig. 43. FGPMOPA1 GPS module

Table 12. Specifications of GPS

Parameter	Specification
Chip set	MediaTek Single Chip Architecture
Dimension	25mm x 25mm x 4mm
Power	62mA @ acquisition 45mA @ tracking
Position Accuracy	< 3m CEP (50%) without SA (horizontal)
Communication	TTL and RS-232
Max Update Rate	5Hz(Default : 1Hz)

3.4.5 배터리 및 전원회로

잠수정의 설계 시 가장 중요한 부분 중 하나가 배터리이다. 잠수정이 임무를 수행하기 위해서 배터리의 용량을 결정하며 결정된 용량에 따라서 잠수정의 사이즈에 까지 영향을 준다. 이전까지는 값이 싸지만 크기가 크고 무거운 납축전지를 이용하여 잠수정의 전원으로 사용하였지만 최근에 작고 가볍고 용량이 큰 리튬폴리머 배터리의 가격이 많이 내려가서 리튬폴리머 배터리를 사용하였다. 만타형 무인잠수정의 작업시간은 최대 4시간으로 설정하였으며 Fig. 44의 25.7V 6.6AH 리튬폴리머 배터리 5팩을 사용하여 추진기, 서보모터, On-board PC 및 각종 센서들의 소비전력을 계산하여 운용시간을 충족하는 하게 설계 하였다.

잠수정의 전원은 배터리로부터 공급어지며 각 센서 및 구동에 필요한 장비들은 각각의 Volt를 필요로 한다. 배터리 Volt 값을 쉽게 변환하기 위한 소자로 DC-DC Converter가 이용된다. 전원부의 모든 전원은 Fig. 45의 전압분배회로를 통하여 공급된다. 전압분배회로의 출력 전압은 5V, 12V이며 DC-DC Converter를 통해서 차폐(Isolation)되어 있다. 추진기와 서보모터같이 순간 출력이 높은 장비들에 의한 노이즈를 줄이기 위한 방법이다.



Fig. 44. Lithium-polymer battery

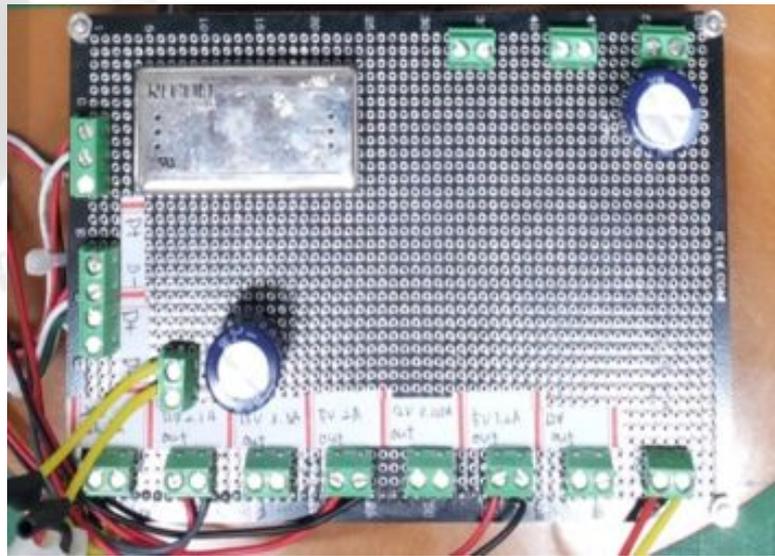


Fig. 45. Power converting circuit

3.6 통신

만타형 무인잠수정의 자유항주 실험을 위해서는 잠수정과 Host PC간의 통신을 비롯하여 각 센서와 제어보드간의 통신이 절대적으로 필요하다. 만타형 무인잠수정은 Host PC와 통신을 위하여 WIFI통신을 사용하며 DVL, TCM3 센서와 On-board PC와는 RS-232 통신으로 통신을 한다. 서보모터 제어에는 RS-485 통신이 이용되었다.

4. 실험역 성능 시험

만타형 무인잠수정의 실험역 시험은 운동성능 시험, 제어 실험 순으로 진행되었다. 먼저잠수정의 운동성능 시험을 통해서 운동특성을 파악하였다. 운동성능이 파악을 통해서 제어 알고리즘을 적용하였을 때 제어의 가능성을 파악하기 위한 기초 실험이다. 제어실험은 PID 제어를 적용하여 기본적인 방향 제어와 수심 제어를 하였으며 이를 통해서 최종적으로 경로 주행을 목표로 한다.

4.1 운동성능 시험

잠수정의 운동성능을 파악하기 위하여 직진, 선회, 지그재그 운동에 대하여 실험을 실시하였다. 실험역 시험 장소는 한국해양대학교 Figs. 46-47의 요트 선착장이며 방파제로 둘러 싸여 있어 잠수정의 기초 실험에 유리한 입지조건을 지니고 있다. 만타형 무인잠수정의 운동 성능을 실험하기 위하여 수면에서 북쪽 방향으로 0.4~0.7m/s의 속도로 실시하였다. 실험과 시뮬레이션을 비교하기 위해 유사한 목표 값을 주고 실험을 시시하였으나 실제 실험은 안전을 위해 로프에 묶여 있으며 조류의 방향에 대한 정확한 정의를 내리기 어려워 실험과 시뮬레이션의 유사성을 더 중요시 하였다. Fig. 48은 실제 실험을 하는 모습이다.



Fig. 46. Test site of Manta-type UUV



Fig. 47. Test site of Manta-type UUV



Fig. 48. Performance test of Manta-type UUV

4.1.1 직진 운항

만타형 무인잠수정의 주행성능을 확인하기 위하여 초기에 정지한 상태에서 수직타각 0° 로 출발하여 0.4m/s 의 속도를 갖고 직선을 주행하는 실험을 수행하였고, 이에 대한 결과를 Figs. 49-50에 나타내었다. 실험에 의한 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해보면 시뮬레이션에 비하여 잠수정의 이동거리가 1.5m 가량 적었으며 직진주행 시에 잠수정의 오른쪽으로 치우쳐지는 경향을 나타내었다. 이는 실험 시 잠수정 묶인 로프에 장력에 의한 영향으로 예상된다. 오른쪽으로 치우쳐

지는 경우는 요트선착장으로 유입되는 조류에 의한 영향이라 생각되어진다. 하지만 시뮬레이션 결과와 큰 차이를 발생하지 않고 유사한 양상을 나타내고 있다.

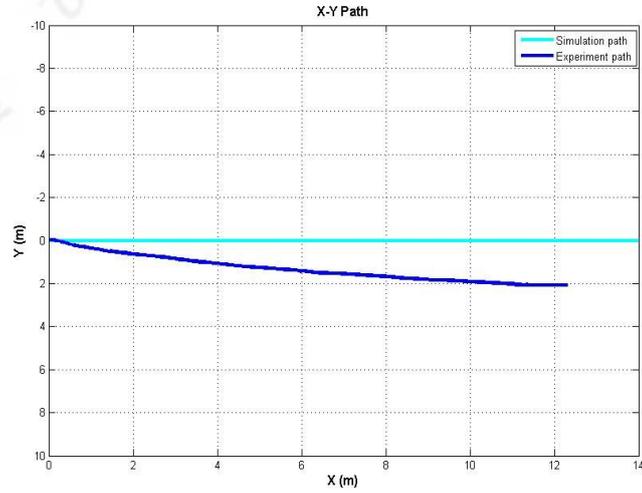


Fig. 49. Trajectory in horizontal plane

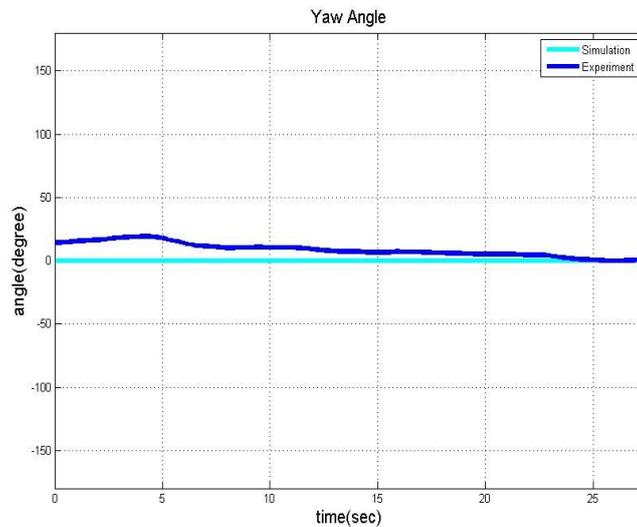


Fig. 50. Yaw angle

4.1.2 수평 선회

만타형 무인잠수정의 선회성능을 확인하기 위하여 수직타의 각도를 30° 입력했을 경우에 대한 실험 결과를 Figs. 51-52에 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 비교해보면 시뮬레이션에 비하여 0.2m 더 큰 3.7m 반경으로 잠수정이 선회함을

보이고 있다. 또한 직진주행 시와 마찬가지로 잠수정의 오른쪽으로 치우쳐지는 경향뿐만 아니라 절대좌표계에 대해서 전방에서 후방으로 치우쳐지는 경향을 나타내었다. 이는 마찬가지로 선착장으로 유입되는 조류에 의하여 잠수정이 오른쪽으로 그리고 선회해서 입구와 반대방향이 되었을 때 조류의 영향을 받아 더 멀리 이동하는 현상이 나타난다고 유추할 수 있다. 그에 따라 시뮬레이션에 비해 빨리 선회하지 못하기 때문에 선수동요각도도 더 작은 값을 나타내고 있다.

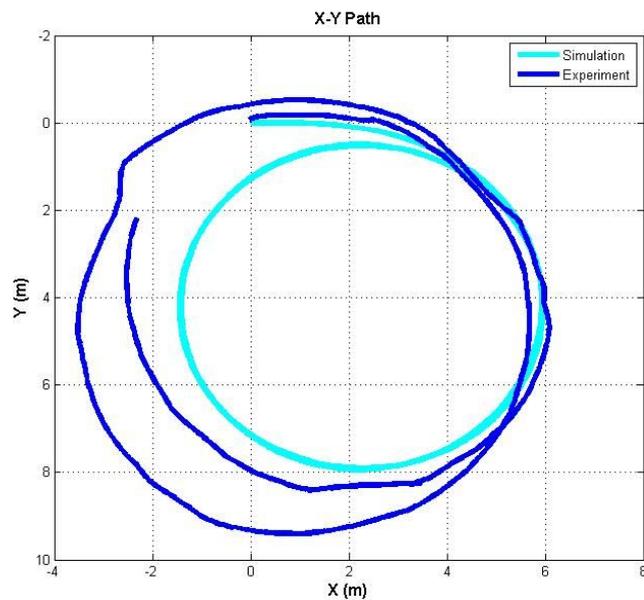


Fig. 51. Trajectory in horizontal plane

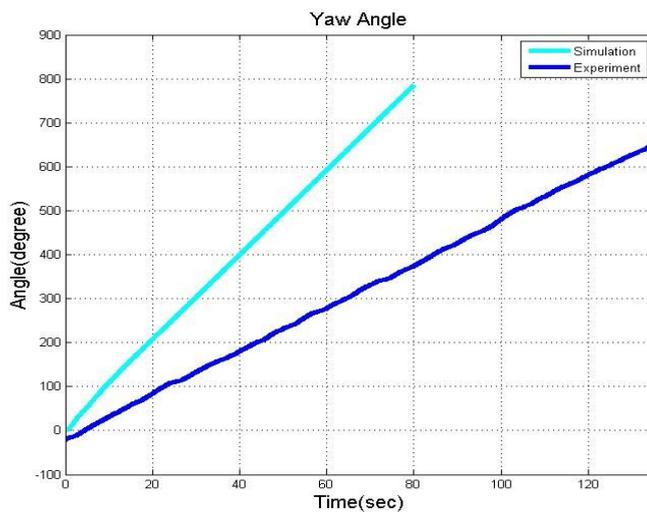


Fig. 52. Yaw angle

4.1.3 수평 지그재그

Figs. 53-54에서는 잠수정의 수평 지그재그 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었다. 지그재그 실험 조건은 수직타와 선수동요각도에 대하여 $-30^{\circ}/30^{\circ}$ 의 조건으로 하였으며 같은 시간에 잠수정이 시뮬레이션에 비하여 상대적으로 적은 거리를 이동한 결과를 보이고 있다. 이는 잠수정이 지그재그 운동을 하면서 좌우 측면이 조류의 영향을 받게 되고 이는 조류에 의한 항력에 의하여 진행방향에 대한 이동거리가 점점 줄어드는 경우라고 생각되어진다. 선수동요각도의 변화는 유사한 형태를 보이고 있지만 시간이 지날수록 점점 시뮬레이션과 차이를 보이고 있다.

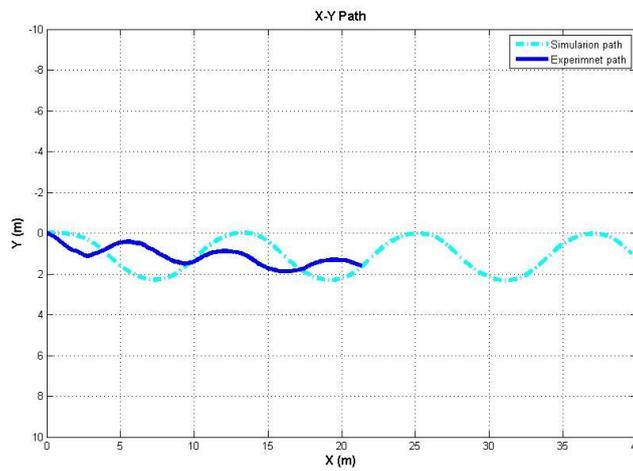


Fig. 53. Trajectory in horizontal plane

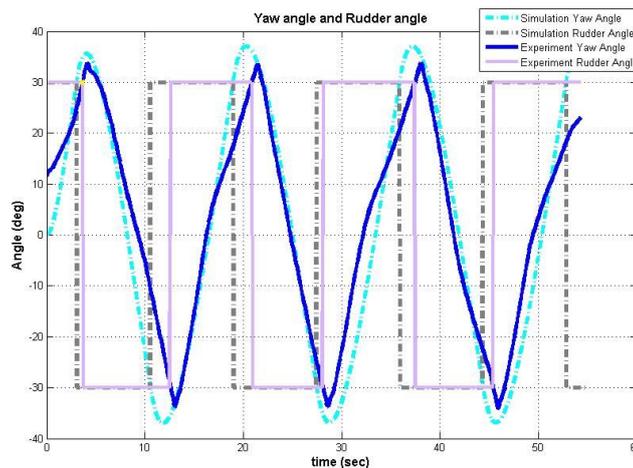


Fig. 54. Yaw angle

4.2 자율운항 성능시험

제어실험은 방향제어와 수심제어를 실시하였다. 수직면과 수평면으로 각각을 분리하여 제어하며 제어기는 PD제어기를 사용하였다. 방향제어는 선수동요각을 0° , 45° 를 유지하도록 제어 입력을 주고 P계인 $K_{p\psi}$ 와 D계인 $K_{d\psi}$ 를 조절하면서 만타형 무인잠수정에 알맞은 PID 계수를 찾아내면서 실험을 하였으며 수심제어는 목표수심을 0.5m로 설정하여 잠수정에 적절한 PID 계수를 구하여 적용하는 실험을 실시하였다.

4.2.1 방향제어

방향제어는 목표각을 0° 와 45° 로 하였으며 제어기는 PD제어기를 사용하였다. Figs. 55-56은 목표각을 0° 로 하여 PID 제어 시에 운항경로와 선수동요각을 보이고 있다. 선수동요각은 잠수정의 선수방향을 x축의 (+)이며 수평면의 운항경로가 목표경로와 비슷한 모습을 보이고 있다. 반복적인 실험을 통해서 P계인 $K_{p\psi}$ 를 114.59, D계인 $K_{d\psi}$ 를 1.145로 설정하였다.

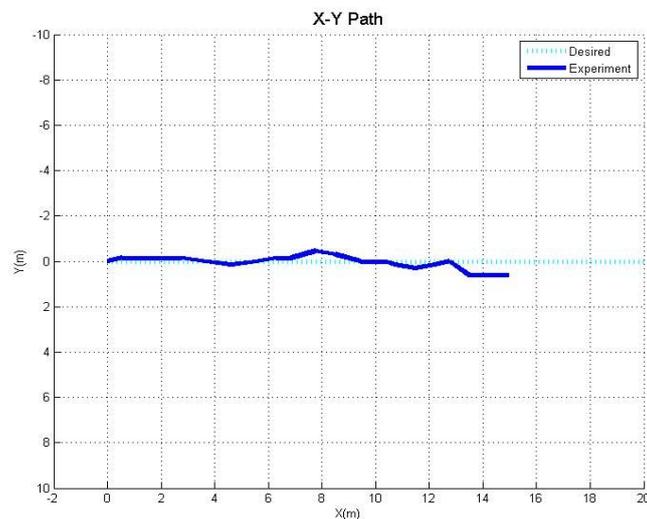


Fig. 55. Trajectory in horizontal plane

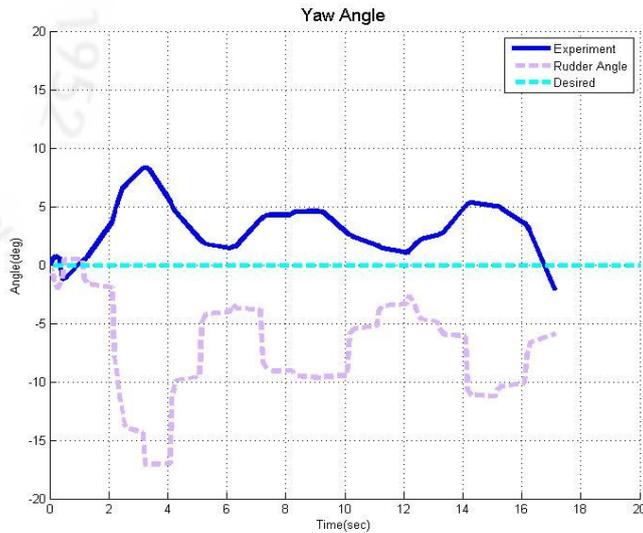


Fig. 56. Yaw angle and rudder angle

목표각을 45° 하며 동일한 계인으로 설정하여 실험한 제어결과도 목표각 0° 제어할 때와 비슷한 양상을 보였다. Fig. 57에서 목표경로와 수평하게 나타나며 이는 x(-)방향의 조류가 균일 하게 잠수정에 영향을 주었다고 판단된다. 또한 Fig. 42의 선수동요각도 수직타의 입력이 계속적으로 (+)방향으로 타력을 주어도 45° 이하의 선수동요각 제어에 영향을 주었다고 판단된다.

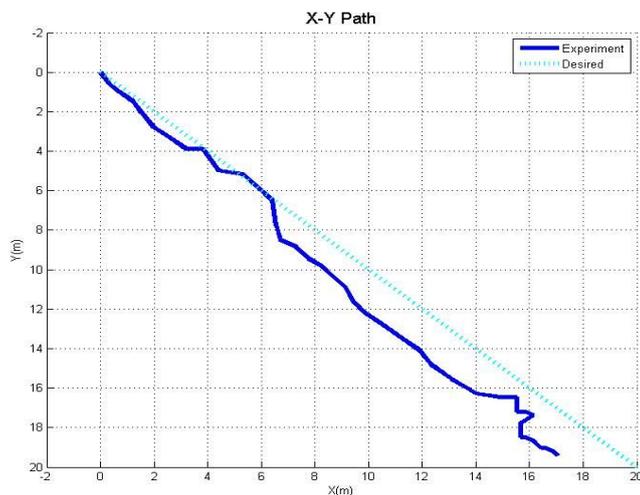


Fig. 57. Trajectory in horizontal plane

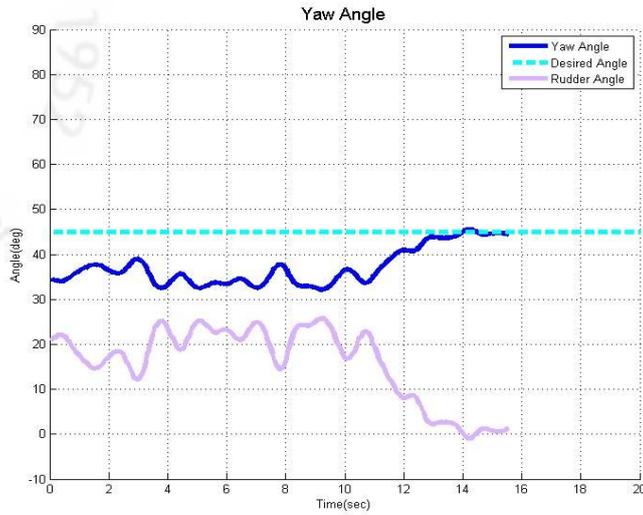


Fig. 58. Yaw angle and rudder angle

4.2.2 수심제어

수심제어는 목표수심을 0.5m로 설정하였으며 방향에 대한 제어를 하지고 수평 타각을 0°로 고정하여 실험하였다. Fig. 59에서 심도에 대한 결과를 보이고 있다. 잠수정의 속도가 빠르지 않기 때문에 오버슈트는 0.01m로 매우 작았으며 제어입력은 입력한 후 0.5m에 도달하는 시간은 7초 정도 이다. Fig. 60는 수평면에 대한 이동경로를 보이고 Fig. 61는 x, y, z축에대한 경로를 나타낸다. 실험시 P계인 K_{pz} 을 20으로 설정하여 실시하였다.

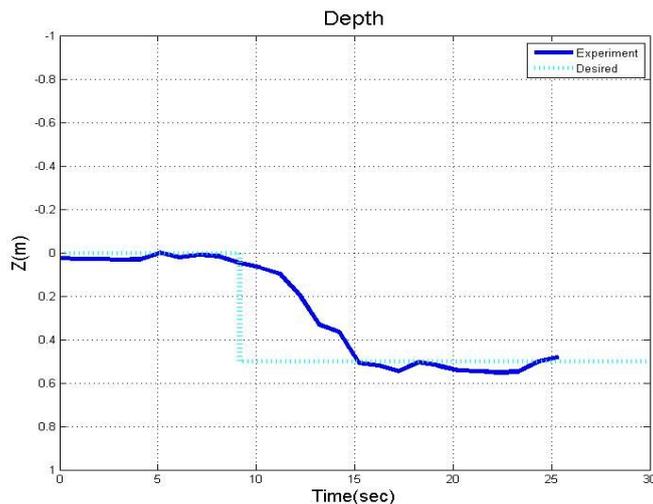


Fig. 59. Trajectory in vertical plane

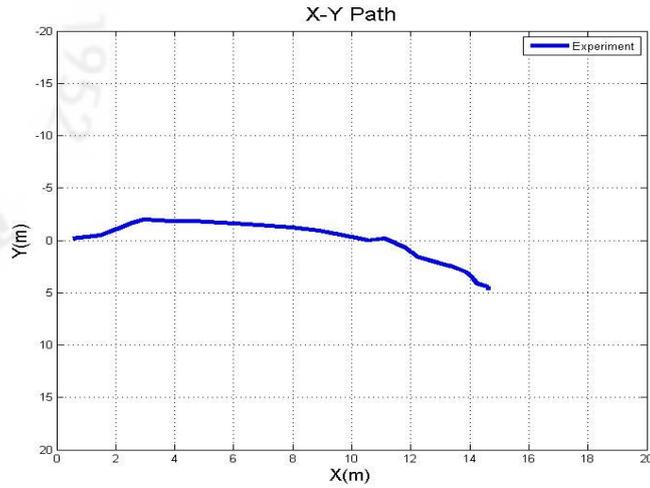


Fig. 60. Trajectory in horizontal plane

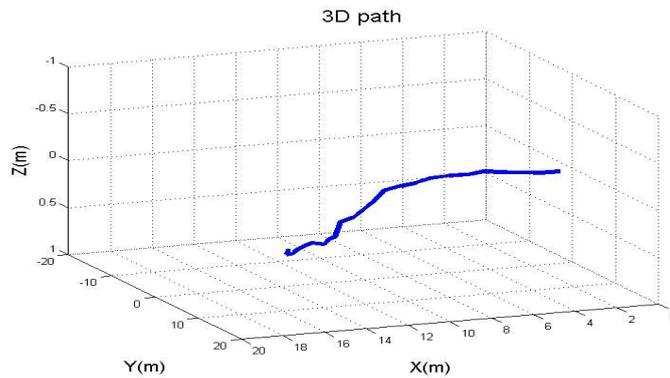


Fig. 61. Trajectory in 3D plane

4.2.3 자율 경로주행

자율 경로주행 성능시험은 시뮬레이션과 동일하게 목표각에 대해서 가시선 (LOS, Line of Sight)방법을 이용하여 실행하였다. 목표좌표를 정하고 좌표의 반경인 ρ_c 안에 잠수정이 이동하게 되면 다음 좌표로 향해서 이동하도록 프로그래밍 되었다. 실험해역은 이전의 실험과 다르게 Fig. 62의 해역에서 진행되었으며 잠수정의 시작 지점의 좌표를 P0(0, 0)m로 설정하여 네 개의 포인트 P1(-30, 50)m, P2(10, 50)m, P3(20, 20)m, P0(0, 0)m를 통과하도록 설정하여 실시하였다. 이때 추진기의 추력은 80%로 설정하였다. 목표좌표의 반경 ρ_c 의 크기를

10m로 설정하여 실험 하였다. 실험 시에 외력으로 인해서 잠수정이 정확히 좌표 반경을 통과하지 못하고 하나의 좌표로 들어가기 위해서 계속해서 운항하는 현상을 피하기 위해 점진적으로 더 넓은 반경을 주어 실험을 하였으며 실험 해역에서 10m의 반경으로 하였을 때 4개의 목표좌표 반경을 통과하는 결과를 얻을 수 있었다. 목표방향각 추정을 위한 제어기는 P제어기를 사용하였으며 이때 P계인 $K_{p\psi}$ 는 114.59로 설정하였다. Fig. 62는 자율운항경로를 나타내고 있다. P0(0, 0)포인트에서 잠수정이 출발하여 10초간 GPS신호가 경로 실재 경로에서 벗어나게 계속 되었으나 그 이후에 계속된 GPS데이터를 이용하여 P1포인트의 목표좌표 반경으로 들어가는 것을 볼 수 있다. 또한 목표좌표 반경에서 바로 선회가 되는 현상을 보이는데 이는 잠수정에 연결된 안전용 로프에 작용되는 장력과 강한 바람에 의한 수면의 파에 의한 영향이 있는 것으로 예측된다. Fig. 63은 목표방향각, 선수동요각과 수직타각을 보이고 있으며 목표방향각 ψ_d 를 추종하기 위한 수직타각에 변화에 의한 잠수정의 선수동요각 ψ 의 변화를 보인다. 현재 자율 경로주행은 목표좌표 반경이 상당히 크며 외력에 의해서 실험에 큰 영향을 받는 경향을 보이고 있다. 이를 해결하기 위해서는 외란에 강인한 제어기의 적용과 잠수정의 추진력을 더 높여 조류의 힘의 영향을 이겨내는 방법을 찾는 연구가 필요하다.



Fig. 62. Navigation control site for Manta-type UUV

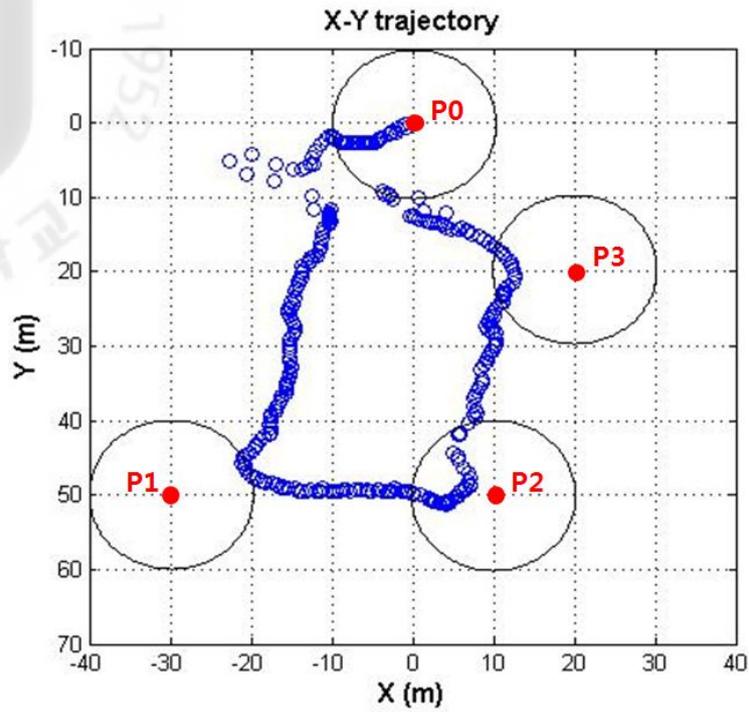


Fig. 63. Trajectory in horizontal plane

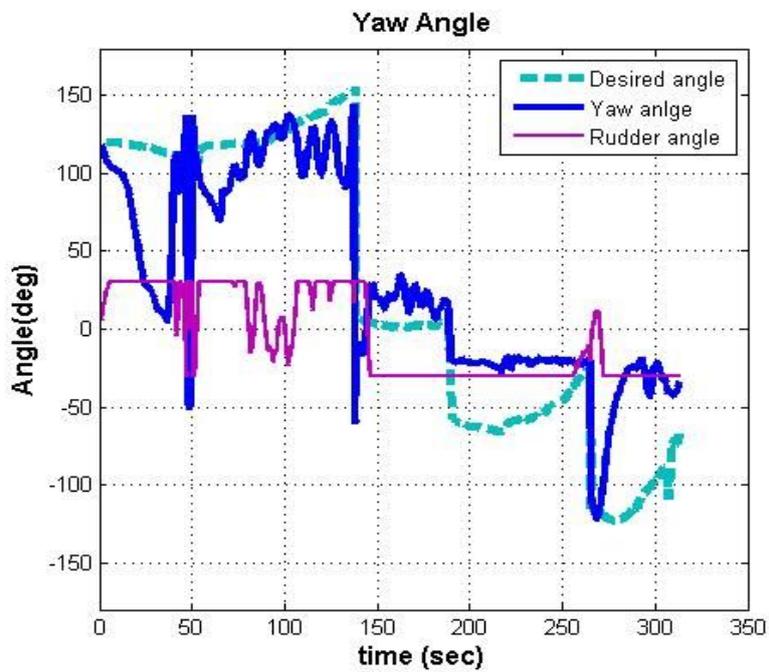


Fig. 64. Yaw angle and rudder angle

5. 결론

본 논문에서는 만타형 무인잠수정의 운동성능 해석을 바탕으로 하드웨어 제작 과정과 내부 시스템의 구성 그리고 운동성능 및 자율운항을 위한 실험에 대해 기술하였다. 잠수정의 운용을 위해서 기구적인 설계를 하였으며 계측 및 제어 시스템을 구성하기 위하여 On-board computer를 이용하였다. 모든 센서들은 Computer와 Serial 통신을 통해서 실시간 센서 데이터를 전송한다.

만타형 잠수정에 대한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며 사용된 6자유도 운동방정식은 만타 형상에 대한 유체력 미계수를 측정한 값을 이용하여 실험과 비교 할 수 있도록 하였다.

만타형 잠수정은 자율운항을 목표로 제작 되었으며 최종적으로는 실험 해역에서 자율 경로주행을 실시하였다. 운동성능 검증을 위한 실험역 시험을 실시하였다. 수직타각을 30° 로 한 선회시에 3.7m의 선회 반경을 보였으며 $-30^\circ/30^\circ$ 지그재그 시에는 0° 에서 30° 로 방향을 전환하는데 3초가량의 시간이 소요되었다. 이를 토대로 만타형 잠수정이 충분히 수백미터이상의 경로주행을 할 수 있는 운동성능을 가지고 있음을 확인하였다. 경로주행을 위해서는 제어기의 설계 및 튜닝 과정이 필요하며 이를 위해 방향 및 수심제어 실험을 하였으며 이 결과 목표하는 방향 및 수심을 잘 추종함을 검증 하였다. 하지만 수심제어 시에 외란이 없을 때 목표수심을 잘 추종하였으나 외란이 심하거나 Roll각과 Pitch각이 변화가 30° 이상 발생하면 목표수심을 유지하지 못하는 결과를 보였다. 이 때문에 수평면에서만 자율 경로주행을 실시하였다. 자율 경로주행은 네 개의 포인트를 설정하여 10m 반경 내에 들어오면 다음 포인트로 진행하도록 하여 진행하였다. 잠수정의 자율 경로주행 결과는 매 실험마다 조금씩 다른 결과를 보이고 있으며 이는 실험역에서 외란이 잠수정의 운항에 큰 영향을 미치는 것으로 예상된다. 또한 GPS 센서를 통한 경로 데이터는 최대 3m의 오차를 가지고 있으며 DVL의 경우에는 속도값을 적분하기 때문에 시간이 지날수록 적분오차가 증가하는 특성을 가지고 있어서 정밀한 경로의 계측을 위한 필터설계 및 알고리즘 개발이 필요하다. 그리고 잠수정의 안전을 위해서 사용하는 로프에 걸리는 장력이 운동성능에 영향을

주는데 이를 제거하기 위해서 잠수정의 위험 상황에 대한 대응 알고리즘의 도입이 필요할 것이다.

향후에는 설계된 시스템을 이용하여 더욱 강인한 제어를 도입하여 실해역의 외란에도 강인하게 제어할 수 있는 제어기 연구가 필요하다. 또한 기구적인 부분에서도 4개의 수평타의 제어가 각각 될 수 있는 기구적 설계를 통해서 더 낫은 결과를 낼 수 있다고 본다.

참고문헌

- [1] 최중락, “무인잠수정 발정 방향,” 국방해양과학기술과 수중로봇 발전방향 포럼, pp.2-60, 2011.
- [2] 박진영, “소형 무인 잠수정의 자세 제어 구현에 관한 연구,” 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 2005.
- [3] 고성협, 정상기, 윤종수, 최형식, 배진호, 김준영, “만타형 무인잠수정의 자유항주모형 성능시험,” 2011년도 해양공학회 추계학술대회, pp.101~104, 2011.
- [4] 변승우, “수중탐사용 Hovering AUV의 Test-bed 개발,” 제주대학교 해양시스템공학과 석사학위논문, 2007.
- [5] 배준영, 김정중, 손경호, “대각도 받음각을 갖는 무인잠수정에 작용하는 동유체력 특성에 관한 실험적 연구,” 한국항해항만학회지, 제35권 제3호, pp.197-204, 2011.
- [6] 손경호, 이승건, 하승필, “Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학적모델 및 조종응답 특성,” 대한조선학회논문집, 제43권 제4호, pp.399-413, 2006.
- [7] 이승건, 손경호, 이상의, 황성준, 서정호, “만타형 수중운동체의 사향시험에 관한 연구,” 한국항해항만학회지, 제29권, 제8호, pp.679-684, 2005.
- [8] A. J. Healey, D. Lienard, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol. 18, No. 3, 1993.
- [9] T. I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [10] M. Gertler, G. R. Hagen, "Standard Equation of Motion for Submarine Simulations," NSRDC Report No. 2510, 1967.
- [11] Abkowitz, Martin A., "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles," The MIT Press, Cambridge, 1969.
- [12] Joonyoung Kim, Kihun Kim, Hang S. Choo, Woojae Seong, Kyu-Yeul Lee, "Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 27, No. 4, pp.830-840, 2002.

Appendix

Hydrodynamic derivatives (model size)

Der.	Value	Der.	Value
m'	0.07129	K'_v	0.00166
I'_{xx}	0.00081	$K'_{\rho \rho }$	0.00000
I'_{yy}	0.00352	K'_{wp}	-0.00166
I'_{zz}	0.00407	K'_{qr}	-0.00183
x'_G	-0.01386	K'_{vq}	0.00117
z'_G	0.01717	K'_{wr}	-0.00117
x'_B	-0.01386	K'_{vw}	-0.03056
z'_B	0.00051	K'_p	-0.00619
X'_u	-0.00535	K'_v	0.00007
X'_{wq}	-0.09533	K'_{vvv}	-0.000002
X'_{vr}	0.06476	K'_r	-0.00002
X'_{qq}	-0.00503	$K'_{\delta r}$	0.00309
X'_{rr}	-0.00619	$K'_{\eta s}$	0.02354
X'_{pr}	-0.00166	M'_q	-0.00113
X'_u	-0.01025	M'_w	-0.00503
X'_{vw}	0.05610	M'_{vr}	0.00166
$X'_{\delta r \delta r}$	-0.01326	M'_{vp}	-0.00619
$X'_{\delta s \delta s}$	-0.03633	M'_{rr}	0.00000
$X'_{\eta s \eta s}$	-0.03633	M'_{pp}	0.00000
Y'_v	-0.06476	$M'_{q q }$	-0.00740
Y'_p	0.00166	M'_{pr}	-0.00057
Y'_r	0.00619	M'_*	0.00499
$Y'_{\rho \rho }$	0.00000	M'_w	0.06413
Y'_{wp}	0.09533	M'_{ww}	-0.04080
Y'_{pq}	0.00503	M'_{www}	0.22741
Y'_p	0.00000	M'_q	-0.00454
Y'_r	0.03717	$M'_{\delta s}$	0.02102
Y'_v	-0.14624	N'_r	-0.00296
Y'_{vvv}	0.00390	N'_p	0.00000
$Y'_{\delta r}$	-0.02785	N'_v	0.00619
Z'_w	-0.09533	N'_{wp}	-0.00503
Z'_q	-0.00503	N'_{qr}	0.00000
Z'_{vp}	-0.06476	$N'_{r r }$	-0.00149
Z'_{pp}	0.00166	N'_{pq}	0.00085
Z'_{pr}	0.00619	N'_p	0.00166
Z'_*	0.02642	N'_{vq}	-0.00166
Z'_w	-0.69427	N'_v	0.01388
Z'_{vw}	-0.53911	N'_{vw}	-0.01582
Z'_{www}	-1.82877	N'_{vvv}	-0.00623
Z'_q	-0.01568	N'_{uvvv}	-0.01153
$Z'_{\delta s}$	0.09222	N'_r	-0.01078
K'_p	-0.00198	$N'_{\delta r}$	0.00834
K'_r	0.00000		

감사의 글

2년이란 시간이 참 빠름을 느끼며 석사과정의 마지막 마무리를 하며 저를 뒤돌아봅니다. 잠수정을 만들 수 있으면 참 멋지겠다는 생각만으로 시작한 연구가 걸음마를 뒀음을 느낍니다. 많이 모자람을 느낍니다. 그리고 이제부터가 정말 시작이라 생각이 듭니다.

연구생으로 1년 석사2년 3년이란 긴 시간 동안 지도해주신 김준영 교수님과 배진호 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 제주대학교 해양시스템 공학과에서 열정을 다하여 여러 분야의 학문을 전수해주신 조일형 교수님, 이종현 교수님, 팽동국 교수님 감사드립니다. 교수님들이 계시기에 꿈과 희망을 가지게 되었습니다. 또한 어려운 환경에서 실험에 도움을 주신 한국해양대학교 최형식 교수님 감사드립니다.

학부생 때부터 대학원 까지 많은 조언과 도움을 주신 승우형, 혁준이형, 태훈이형, 잉형, 관석이형, 형동이형, 태희형 감사드립니다. 또한 저와 같이 공부한 재일이형, 주호형, 정록이형 즐거웠고 감사합니다. 석사과정 중 실험실을 옮기는 어려운 상황에서 동고동락한 한국해양대학교 상기형, 인규형, 경원이형, 기환이, 승민이, 건석이, 영국이 모두 고마움을 전합니다. 여러분 덕분에 무더운 여름 에어컨 없는 실험실에서 밤잠을 설치며 실험하고 바다의 봄, 여름, 가을, 겨울 사계절을 견딜 수 있었습니다.

연구에 큰 도움을 주신 한양대학교 김동희형, 해양연구원 김영식 연구원님, 주식회사 한화 이필엽 연구원님, 대우조선해양 박명철 연구원님, 주식회사 피코 한종석 사장님, 오순영 사장님 감사드립니다.

내 소중한 친구들 대희, 정현, 시훈, 철원, 군보, 학교생활을 같이한 해양시스템공학과 윤중이형, 명승이형, 보람이 또한 거론 못한 선후배 친구들 모두 감사합니다.

끝으로 항상 내편인 부모님과 가족에게 감사드립니다.



나무는 자기 몸으로
나무이다.
자기 온몸으로 나무는 나무가 된다.

자기온몸으로 햇빛고 영하 심삼도
영하 이십도 지상에
온몸을 뿌리박고 대가리 쳐들고
무방비의 나뭇가지로 서서
두 손 올리고 별 받는 자세로 서서
아, 별 받는 몸으로, 별 받는 목숨으로, 그러나
이게 아닌데 이게 아닌데

온 혼으로 에타면서 속으로 몸속으로 불타면서
버리면서 거부하면서 영하에서
영상으로 영상 오도 영상 심삼도 지상으로
밀고 간다, 막 밀고 올라간다.

온몸이 으스러지도록
으스러지도록 부르터지면서
터지면서 자기의 뜨거운 혀로 싹을 내밀고
천천히, 서서히, 문득, 푸른 잎이 되고
푸르른 사월 하늘 들이받으면서

나무는 자기 온몸으로 나무가 된다.
아아, 마침내, 끝끝내
꽃피는 나무는 자기 몸으로
꽃피는 나무이다.

황지우, <<겨울-나무로부터 봄-나무에게로>>