



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

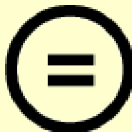
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

천해용 자율무인잠수정의
운동시물레이션과 실험



2011년 6월

부 경 대 학 교 대 학 원

메 카 트 로 닉 스 공 학 과

김 명 욱

공 학 석 사 학 위 논 문

천해용 자율무인잠수정의
운동시물레이션과 실험



지도교수 백 운 경

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함.

2011년 6월

부 경 대 학 교 대 학 원

메 카 트 로 닉 스 공 학 과

김 명 욱

김명욱의 공학석사 학위논문을 인준함

2010년 6월 27일



주 심 공학박사 강 인 필 ①

위 원 공학박사 주 문 갑 ①

위 원 공학박사 백 운 경 ①

목 차

Abstract	1
1. 서론	2
1.1 연구배경	2
1.2 연구목적	4
1.3 연구범위	4
2. AUV 시스템의 구성	5
2.1 AUV 선체 및 유한요소 해석	5
2.2 AUV 추진 및 조타 시스템	9
2.3 AUV 센서/통신/컴퓨터 시스템	13
3. AUV의 동역학 모델	14
3.1 AUV의 운동좌표계	14
3.2 AUV의 6자유도 동역학 모델	16
3.3 AUV의 3자유도 동역학 모델	22
3.4 AUV의 수중항력 계수	28
4. AUV의 운동 제어기 설계	31
4.1 PD제어 및 슬라이딩 모드 제어	31
4.2 AUV의 수평면 운동제어기	36
4.3 AUV의 수직면 운동제어기	51
4.4 Way-point 추적 알고리즘	57
5. AUV의 운동 시뮬레이션	58
5.1 수평면 운동 시뮬레이션	58
5.2 수직면 운동 시뮬레이션	59
5.3 Way-point 추적운동 시뮬레이션	67
6. AUV 운동성능 시험과 시뮬레이션 결과 비교	76
6.1 수평면 운동시험	76

6.2 수평면 Way-point 추적운동 시험	78
6.3 수직면 운동시험	79
7. 결론	80
참고문헌	82
부록	84

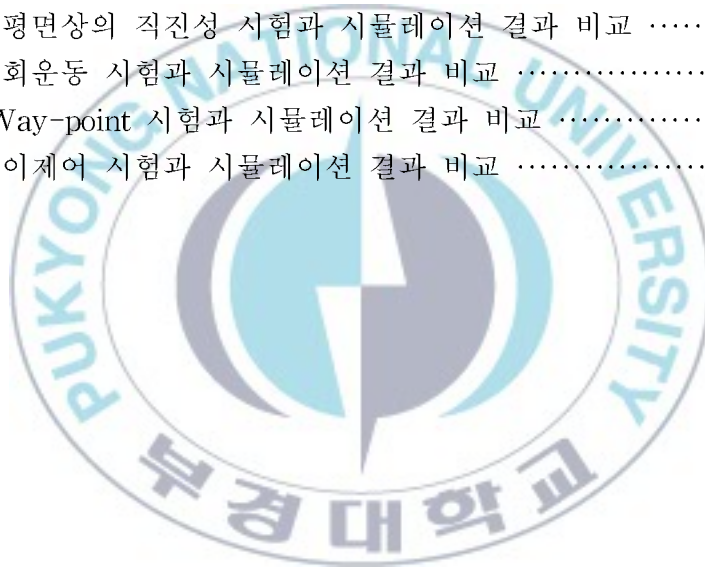


List of Tables and Figures

Table. 1 구조해석 AUV의 자원	7
Table. 2 Twelve state variables of an AUV with 6 degrees of freedom	15
Table. 3 Six state variables of an AUV with X-Y plane	23
Table. 4 Six state variables of an AUV with X-Z plane	26
Table. 5 OS에 따른 감쇠비	39
Table. 6 PD Controller 과 Sliding mode Controller 비교	46
Table. 7 PD Controller 과 Sliding mode Controller 비교	48
Table. 8 PD Controller 과 Sliding mode Controller 비교	50
Fig. 1 AUV의 외형 및 치수	5
Fig. 2 AUV의 내부 및 배치	6
Fig. 3 수심 200m에서 AUV의 구조해석	7
Fig. 4 5노트로 운항시 AUV주변 속도장	8
Fig. 5 선미부 외형 및 내부	9
Fig. 6 추진기의 체결	10
Fig. 7 방향타의 형상과 치수	10
Fig. 8 선체가 10° 기울어졌을 경우 복원모멘트	11
Fig. 9 방향타의 기울기에 따라 발생하는 힘	12
Fig. 10 방향타의 기울기에 따라 발생하는 힘과 모멘트	12
Fig. 11 전장 시스템 배치개념	13
Fig. 12 전장 시스템 구성사진	13
Fig. 13 Body-fixed coordinate system	14
Fig. 14 X-Y Planar motion of the AUV	22
Fig. 15 X-Z Planar motion of the AUV	25
Fig. 16 항력계수 측정시험개념	29
Fig. 17 항력계수 도출 시험 장면	29
Fig. 18 Heading Control System Block Diagram	38

Fig. 19 Heading Control Block diagram using Simulink	43
Fig. 20 Step Response ($K_p=-1.0501$, $K_d = -1.8207$)	43
Fig. 21 Step Response ($K_p=-3$, $K_d = -1.8207$)	44
Fig. 22 시간에 따른 Yaw angle	45
Fig. 23 시간에 따른 Rudder angle	45
Fig. 24 시간에 따른 Yaw angle rate	46
Fig. 25 시간에 따른 Yaw angle	47
Fig. 26 시간에 따른 Rudder angle	47
Fig. 27 시간에 따른 Yaw angle rate	48
Fig. 28 시간에 따른 Yaw angle	49
Fig. 29 시간에 따른 Rudder angle	49
Fig. 30 시간에 따른 Yaw angle rate	50
Fig. 31 Simulink Coding	53
Fig. 32 Step Response ($K_p=-0.2407$, $K_d=-0.0493$)	53
Fig. 33 Step Response($K_p=-0.7$, $K_d=-0.5$)	54
Fig. 34 Way - point Flow chart	57
Fig. 35 Turning Simulation(10도)	58
Fig. 36 Turning Simulation(20도)	58
Fig. 37 Turning Simulation(30도)	59
Fig. 38 Depth control block diagram using Simulink	60
Fig. 39 Depth Control ($K_{zp}=0.5$, $K_p= -0.7$, $K_d=-0.5$)	60
Fig. 40 Depth Control ($K_{zp}=0.5$, $K_p= -3.5$, $K_d=-1.8$)	61
Fig. 41 Depth Control ($K_{zp}=1.0$, $K_p= -3.5$, $K_d=-1.8$)	61
Fig. 42 Depth Control ($K_{zp}=1.5$, $K_p= -3.5$, $K_d=-1.8$)	62
Fig. 43 Depth Control ($K_{zp}=2$, $K_p= -3.5$, $K_d=-1.8$)	62
Fig. 44 시간에 따른 깊이	63
Fig. 45 시간에 따른 Stern angle	64
Fig. 46 시간에 따른 Pitch angle rate	64
Fig. 47 Pitch Down Simulation(Stern=-5도)	66
Fig. 48 Pitch Down Simulation(Stern=-10도)	66
Fig. 49 Pitch Down Simulation(Stern=-15도)	66
Fig. 50 Pitch Down Simulation(Stern=-20도)	66

Fig. 51 Way - point Simulation ($K_p = -3, K_d = -1.8$)	68
Fig. 52 Way - point Simulation ($K_p = -2, K_d = -5$)	69
Fig. 53 Way - point Simulation ($K_p = -0.2407, K_d = -0.0493$)	69
Fig. 54 Way - point Simulation ($\eta = 5.0, \theta = 0.5$)	70
Fig. 55 Way - point Simulation ($\eta = 5.0, \theta = 0.5$)	71
Fig. 56 Way - point Simulation ($\eta = 7.0, \theta = 0.5$)	71
Fig. 57 Way - point Simulation ($\eta = 5.0, \theta = 0.5$)	72
Fig. 58 Way - point Simulation 비교	73
Fig. 59 Way - point Simulation (Rudder angle)	74
Fig. 60 Way - point Simulation (Yaw angle rate)	74
Fig. 61 수평면상의 직진성 시험과 시뮬레이션 결과 비교	76
Fig. 62 선회운동 시험과 시뮬레이션 결과 비교	77
Fig. 63 Way-point 시험과 시뮬레이션 결과 비교	78
Fig. 64 깊이제어 시험과 시뮬레이션 결과 비교	79



Motion Simulations and Experiments of An Autonomous Underwater Vehicle for Shallow-water Operations

Myoung-Wook Kim

Mechatronics Engineering, The Graduate School.

Pukyong National University

Abstract

Since AUVs operated in shallow water can be subjected to strong currents, tides, and winds, it is essential to use an accurate mathematical model and a robust controller against external disturbances. Especially, AUV activities for mine search, reconnaissance, and surveillance in shallow water at low speeds would be very sensitive to even small disturbances.

In this thesis, dynamic simulations of the AUV were performed using the equations of motion and motion controllers. The equations of motion of the AUV involves many nonlinear terms not only in their motion variables, but also in their right-hand side force terms. The nonlinear force terms contains hydrostatic and hydrodynamic damping forces, lift and drag forces, and added masses.

The motion controllers of the AUV were designed based on PD and Sliding mode control algorithms. The controllers can change the angles of the two rudder fins and two stern fins. The dynamic simulations of the AUV were performed for the horizontal motion, vertical motion, and way-point tracking motions using Matlab. Then the simulation results were analyzed to compare the performance of the two controllers. Also, the motion performance of the AUV was tested in water tank and near sea.

Finally, the simulation results and experiment results were analyzed to verify the motion performance of the AUV.

Keywords : AUV(Autonomous Underwater Vehicle), PD controll, Sliding mode controll, Motion Performance

제 1 장 서론

1.1 연구배경

해양자원에 대한 개발과 해양 공간 이용 등의 필요성이 증대되면서 무인 잠수정에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 무인 잠수정은 심해저 탐사를 위한 목적에서 개발되기 시작하였으나, 점점 천해에도 그 활용 범위를 넓혀가고 있다. 대표적인 활용의 예를 살펴보면 해저지형 조사, 해저자원 탐사, 해양환경 조사 및 감시 그리고 해난 구조 등을 들 수 있다. 최근에는 얕은 수심에서 수뢰의 설치, 발견 및 제거 등 군사적 목적으로 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 무인 잠수정의 적극적인 활용의 대표적인 사례로 미국의 Manta 프로젝트를 들 수 있다.(Wernli, 2002).

무인 잠수정은 크게 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 나눌 수 있다. ROV는 오퍼레이터가 잠수정에 부착된 수중 카메라의 화상정보를 이용하여 직접 조종하는 잠수체로서 수중에서의 작업, 항만이나 연안 호수 등 수심이 얕은 곳의 검사에 적합하다. 반면 AUV는 자신의 위치와 자세 그리고 주위 환경 변화를 탑재된 센서를 통하여 스스로 인지한 후 주행경로를 자율적으로 설정하고 주어진 임무를 수행하는 자율성을 지니는 무인잠수정을 말한다.

AUV는 테더의 존재로 인해 유발되는 항력으로 운동 성능에 제약을 받는 ROV에 비해 보다 넓은 수역에서 탐사용 목적으로 유용하게 사용될 수 있다. 또한 ROV가 갈 수 없는 빙하 아래 영역의 탐사 목적으로도 사용되기도 한다. AUV는 또한 기뢰 탐지 및 제거, 잠수함 탐지 및 추적, 다수의 AUV를 동원한 짧은 시일 내의 광역 탐사 등 군사용 목적으로 사용되기도 한다. 하지만 AUV는 태양열 충전지를 가지고 수면으로 부상하여 충전하는 일부 AUV를 제외하고는 전원의 공급이 탑재된 배터리 용량에 전적으로 의존하기 때문에 작동 시간에 한계가 있으며, 운용자가 실시간으로 AUV의 상태를 파악할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 효율

적이고 안정적인 AUV의 운용을 위해서는 고도의 자율성이 요구된다. (Fossen, 2002).

AUV와 같은 자율 제어를 요구하는 시스템을 설계하기 위해서는 시스템의 실제 물리 현상을 잘 반영하도록 시스템을 수학적으로 모델링할 필요가 있다. 제어 및 추정 등의 여러 영역에서 실제 현상을 기술하고 이해하기 위해서도 시스템을 모델링해야 한다. 시스템 모델링에는 모델을 해석으로 구하는 방법과 측정 데이터를 이용하여 모델을 구성하는 실험적 접근 방법이 있다.

6자유도를 가지는 수중운동체의 수학적 모델은 일반적으로 비선형 연립 미분 방정식의 형태로 표현된다. 이 운동 방정식에는 주로 유체력과 제어력에 관련된 힘과 모멘트가 여러 항 포함되어 있는데, 이들은 속도, 위치, 각속도 및 오일러 각 등의 상태 변수와 이들 값의 변화율 및 제어 날개의 각도(Control surface deflection), 추진기 제어입력 등의 변수에 관한 함수로써 표현된다.



1.2 연구목적

본 연구에서는 자율 무인잠수정의 동역학을 고려한 설계를 통해 자율무인잠수정의 시스템을 구성하고 AUV의 운동성능을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하는 것을 목적으로 한다. 여기서 자율무인잠수정의 동역학 모델은 외력, 유체정역학적인 힘, 양력, 항력을 포함하고 Added Mass를 포함한 계수들을 가지며 제어 입력각으로써 자율무인잠수정의 Fin angle에 의해 제어된다. 무인 잠수정의 자율 운항 시스템을 설계하기 위하여 약간의 모델링 오차를 가지고 있는 비선형 플랜트에 대해서도 우수한 제어 성능을 가진 것으로 알려져 있는 슬라이딩 모드 제어기와 제어 변수와 기준 입력 사이의 오차에 근거하여 계통의 출력을 제어하는 피드백 제어의 일종인 PD제어기를 설계한다.

무인잠수정의 6자유도 비선형 운동방정식을 선형화시킨 동역학 제어 모델을 구한다. AUV의 운동방정식을 이용한 Matlab 시뮬레이션을 통해 AUV의 평면, 수직 운동 및 Way-point 추적 운동에서 슬라이딩 모드 제어와 PD제어를 사용했을 때의 운동성능과 시험을 통한 수중 운동체의 운동성능을 비교하여 타당성을 검증하는 것을 목적으로 한다.

1.3 연구범위

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 운동체의 시스템 구성에 대해 기술하고 3장에서는 좌표계 설정, 운동방정식에 대해 살펴보며 4장에서는 수중 운동체의 운동제어기 설계에 대해 기술하고 5장에서는 수중 운동체의 운동 시뮬레이션 결과를 나타내었으며 6장에서는 수중 운동체의 운동성능 시험 결과에 대해 기술하고 7장에서는 운동성능 분석 및 고찰에 대해 기술하며 8장에서 요약 및 결론에 대해 기술한다. 부록에서는 AUV의 유체력 계수에 대해 기술하였다.

제 2 장 AUV 시스템의 구성

2.1 AUV 선체 및 유한요소 해석

2.1.1 AUV의 외형치수와 중량



Fig. 1 AUV의 외형 및 치수

2장에서는 AUV Test Bed의 선체 개발에 대하여 다룬다. AUV의 외형은 Fig. 1과 같다. AUV의 선체는 선수부, 중앙부, 선미부의 3부분으로 크게 나눌 수 있다. 선수부의 길이 205mm, 중앙부의 길이는 1003mm, 선미부의 길이는 531mm이며, 총길이는 1739mm이다. AUV의 총 중량은 물무게를 포함할 경우 약 37kgf이며, 컴퓨터를 이용하여 계산되어진 부력은 약 43kgf이다. 약 6kgf의 양성부력을 가지고 있다. 선체를 구성하고 있는 재료는 Al6061을 선택하였으며, 선수부는 Engineering Plastic 중에서 PC (Poly Carbonate)를 선택하여 제작하였다.

2.1.2 AUV의 내부형상 및 배치

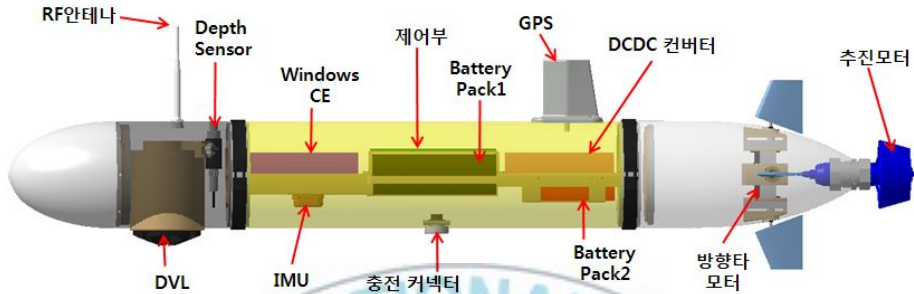


Fig. 2 AUV의 내부 및 배치

AUV의 내부와 탑재장비의 배치는 Fig. 2와 같다. 탑재장비의 배치는 전장부의 배선과 센서장비가 노이즈에 노출되는 정도를 고려하여 결정하였으며, 무게중심이 선체의 중앙에 올수 있도록 좌우대칭을 고려하여 배치하였다. 현재 무게중심 위치와 부력중심의 위치를 맞추기 위해 납을 추가하였지만, AUV의 기능적 측면과 관련된 사항이 아니므로 탑재장비 파트에서는 무게중심 위치 조절에 사용된 납의 내부배치에 대한 사항은 생략하였다.

2.1.3 AUV의 구조해석

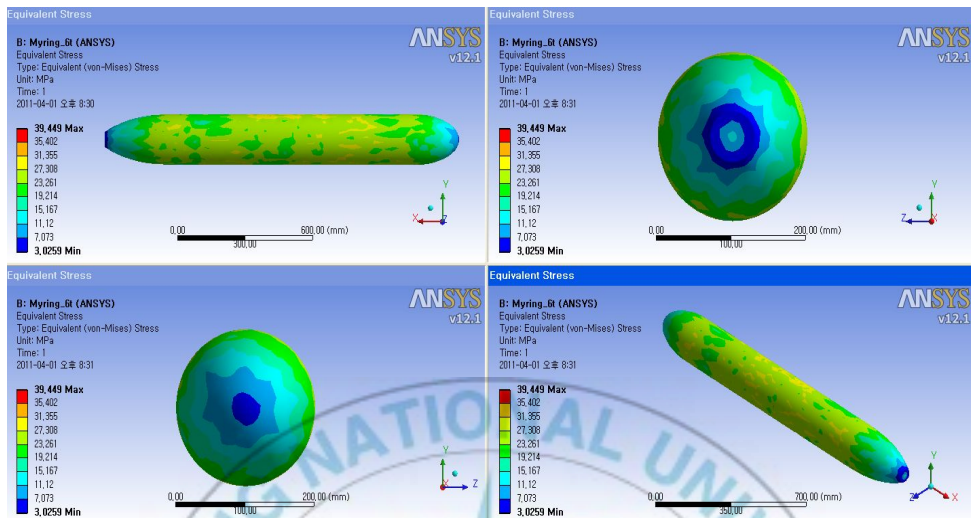


Fig. 3 수심 200m에서 AUV의 구조해석

Fig. 3은 수심 200m에서 압력이 20bar가 작용할 때의 AUV에 대해서 구조해석을 수행한 결과이다. 대상이 되는 AUV의 제원은 Table. 1과 같다.

Table. 1 구조해석 AUV의 재원

직경	Φ200
두께	6t
길이	1608mm (추진기 길이 제외)
재질	선수부 : Engineering Plastic(PC) 중양부, 선미부 : Al6061

PC의 파괴강도는 70Mpa이고, Al6061의 항복강도는 55.2Mpa이다. AUV의 구조해석에서 최대응력은 약 34.5Mpa이므로, 응력면에서 안전한 선체 구조로 판단된다.

2.1.4 AUV의 CFD해석

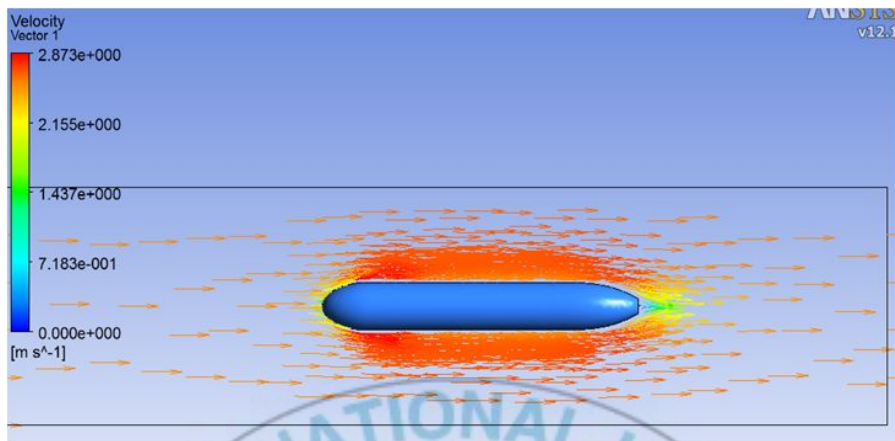


Fig. 4 5노트로 운항시 AUV주변 속도장

AUV의 선수부와 선미부는 모두 Myring Profile을 따라 설계되었다. Fig. 4를 통해 알 수 있듯이, AUV가 5노트로 운항함에 따라 선수부와 선미부에서 비교적 안정적인 유선형 유동이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결과를 통해서 AUV의 선체가 운항 시에 유체의 저항을 적게 받고 있으며, 선미부를 지나가는 유체가 안정적으로 추진기에 유입됨을 알 수 있다.

2.2 AUV 추진 및 조타시스템

2.2.1 추진시스템

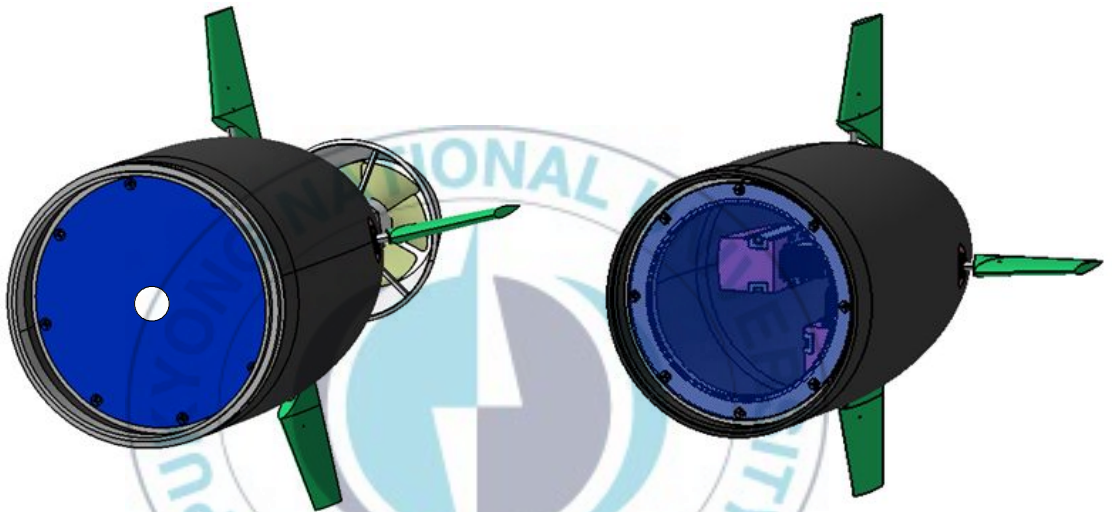


Fig. 5 선미부 외형 및 내부

선미부는 AUV의 주요 추진기와 운동방향을 결정짓는 방향타부로 구성되어있다. AUV의 추진력과 관련된 추진모터는 선미의 끝부분에 위치한다. 선미부 외형 및 내부는 Fig. 5와 같고 추진모터는 추진기모터 고정 홀더에 의해서 고정이 되며 Fig. 6과 같다.

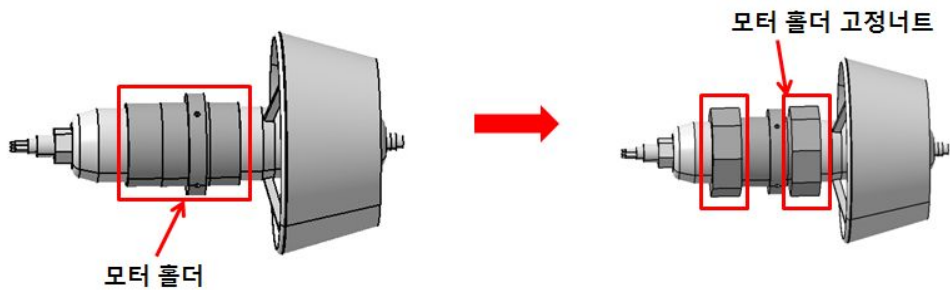


Fig. 6 추진기의 체결

2.2.2 조타시스템

방향타의 경우 AUV가 수평운동과 수직운동이 가능할 수 있도록, 수치적 계산에 의해서 설계되었다. 방향타의 형상과 관련된 그림은 Fig. 7과 같다.

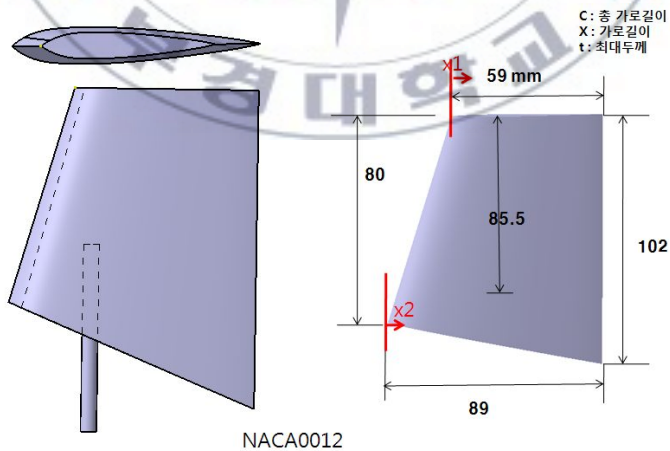


Fig. 7 방향타의 형상과 치수

Fig. 7와 같은 치수로 방향타가 설계되었으며, 방향타의 형상은 미국 익형의 표준규격 중 NACA0012를 이용하여 설계하였다. NACA0012의 형상과 관련된 식은 식 (2.1)과 같다.

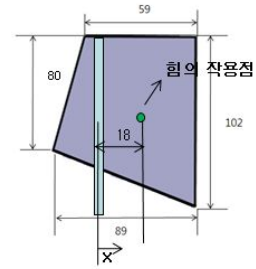
$$y = \frac{t}{0.2}c \left[0.2969 \times \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \left(\frac{x}{c} \right) - 0.3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right] \quad (2.1)$$

방향타를 이용하여 잠수를 하기 위해서는 선체의 기울어진 정도에 따라서 발생하는 복원모멘트보다 큰 모멘트가 방향타에 의해 발생되어야 한다. 이와 관련된 개념은 Fig. 8과 같다.



Fig. 8 선체가 10° 기울어졌을 경우 복원모멘트

선체가 10° 기울어졌을 경우 발생하는 복원모멘트는 $1.33N \cdot m$ 이다. 수평 방향타에 의한 모멘트 발생은 Fig. 9와 같다.



$$\begin{aligned} \blacksquare C_L &= \left[\frac{1}{2\alpha\pi} + \frac{1}{\pi(AR_e)} \right]^{-1} \\ &= \left[\frac{1}{2 \times 0.9 \times \pi} + \frac{1}{\pi \times (2.21)} \right]^{-1} = 3.12 \\ \blacksquare F_L &= \frac{1}{2} \rho C_L S_{Rud} \delta_e v_e^2 \end{aligned}$$

$\bar{\alpha}$: Lift Slope Parameter (0.9)
 b_{Rud} : Span (m)
 AR_e : 유효형상비
 S_{Rud} : 방향타 평면 면적 (m^2)
 δ_e : 방향타 유효 각도 (radian)
 v_e : 선체속도 (m/s)
 C_L : Lift Slope

Fig. 9 방향타의 기울기에 따라 발생하는 힘

수평방향타의 각을 달리했을 때 발생하는 힘과 모멘트에 관련된 내용은 Fig. 10과 같다. 수평방향타가 5도 기울어진 경우 선체가 10도 기울어진 경우보다 모멘트가 크게 발생하므로 AUV가 잠수할 수 있는 운동성능을 가지는 것을 알 수 있다.

5도인 경우	10도인 경우
$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L S_{Rud} \delta_e v_e^2$ $= \frac{1}{2} \times 1025 \times 3.12 \times 6.575 \times 10^{-3} \times 0.087 \times 2.55^2$ $= 5.9N$ $M_L = F_L \times x_L$ $= 5.9 \times (0.528 + 0.018 \cos 5^\circ)$ $= 3.22N \cdot m^{\curvearrowright}$	$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L S_{Rud} \delta_e v_e^2$ $= \frac{1}{2} \times 1025 \times 3.12 \times 6.575 \times 10^{-3} \times 0.17 \times 2.55^2$ $= 11.62N$ $M_L = F_L \times x_L$ $= 11.62 \times (0.528 + 0.018 \cos 10^\circ)$ $= 6.34N \cdot m^{\curvearrowright}$

Fig. 10 방향타의 기울기에 따라 발생하는 힘과 모멘트

2.3 AUV 센서/통신/컴퓨터 시스템

AUV 전장의 배치는 Fig. 11과 같은 형태로 배치되며 실제 배치된 그림은 Fig. 12와 같다. AUV 전장에는 실제 동작에 관련된 시스템을 이루는 주 제어부, 모터제어부, 센서처리부 그리고 외부 사용자의 인터페이스가 되는 외부 사용자 컴퓨터가 있고, 그밖에 IMU, GPS, DVL등의 센서들과 RF모뎀이 탑재 된다. 이 모든 요소들이 구동할 수 있도록 배터리가 포함되며, 각각의 동작 전원 레벨이 다르므로 각각의 요소의 동작 전원 레벨에 맞추기 위하여 DC DC converter를 통하여 전압변환을 한다.



Fig. 11 전장 시스템 배치개념



Fig. 12 전장시스템 구성사진

제 3장 AUV의 동역학 모델

3.1 AUV의 운동좌표계

무인 잠수정은 3차원 공간인 수중에서 6자유도를 갖는 운동을 한다. 수중 운동체의 위치와 자세를 나타내기 위해서 먼저 기준 좌표계(Reference frame)과 물체 고정 좌표계(Body fixed frame)를 정의하여야 한다. 기준 좌표계는 수중 운동체가 출발하는 지점에 대한 해수면 상의 한 점을 원점으로 하여 수중운동체가 출발하는 방향이 해수면에 투영된 방향을 X축, 해수면에 수직인 아래쪽 방향을 Z축, 그리고 오른손 법칙을 사용하여 이미 구해진 두 축으로부터 결정되는 방향을 Y축으로 정한다. 물체 고정 좌표계는 그 중심이 무인 잠수정의 부력중심과 일치하고 그 이유는 부력중심이 무인 잠수정의 대칭면에 위치하기 때문에 모델링을 더 단순화 시킬 수 있기 때문이다. 물체 고정 좌표계는 Fig. 13과 같이 정의한다.

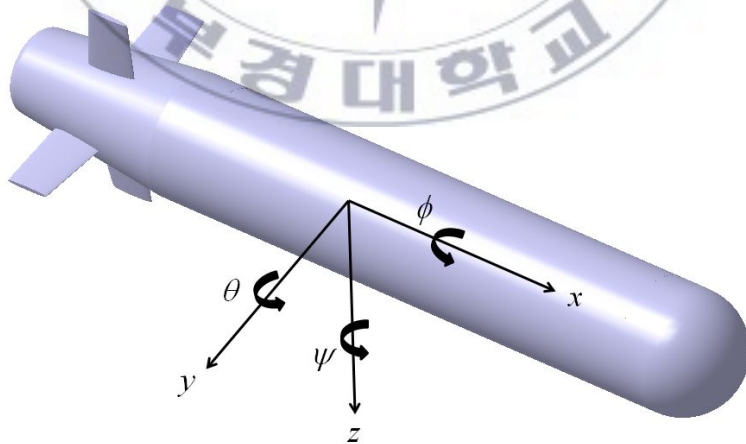


Fig. 13 Body-fixed coordinate system

Table. 2 Twelve state variables of an AUV with 6 degrees of freedom

DOF		Linear and angular velocity	Position and Euler angles
1	Motion in the x-direction (surge)	u	x
2	Motion in the y-direction (sway)	v	y
3	Motion in the z-direction (heave)	w	z
4	Rotate about the x-axis (roll)	p	ϕ
5	Rotate about the y-axis (pitch)	q	θ
6	Rotate about the z-axis (yaw)	r	ψ

6자유도 운동에서 변수는 Table. 2와 같다. $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$, $\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ 는 각각 지표 고정 좌표계에 대한 위치와 자세를 나타내고 $v_1 = [u \ v \ w]^T$, $v_2 = [p \ q \ r]^T$ 은 선체 고정 좌표계에 대한 선속도(Linear velocity)와 각속도(Angular velocity)이다. $\tau_1 = [X \ Y \ Z]^T$, $\tau_2 = [K \ M \ N]^T$ 는 선체 고정 좌표계에 대한 힘과 모멘트이다. 그리고 선체 고정 좌표계와 지표 고정 좌표계에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (3.1)$$

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (3.2)$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\sin\psi \cos\phi + \cos\psi \sin\theta \sin\phi & \sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\phi + \sin\psi \sin\theta \sin\phi & -\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

위와 같이 기준 좌표계와 물체 고정 좌표계를 설정하게 되면 기준 좌표계에 대한 항체의 물체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 오일러 각은 기준 좌표계를 각 축에 대하여 3번 회전시켜 동체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로서, 회전은 ψ (yaw angle), θ (pitch angle), ϕ (roll angle)의 순서로 정한다. 오일러 각의 경우 항체의 자세가 수직에 가까워지면 자세를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있으나 수중 운동체의 경우 자세가 수직에 가까운 운동이 거의 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다고 판단되어 선택하였다.

3.2 AUV의 6자유도 동역학 모델

3.2.1 6자유도 운동 방정식

본 논문의 대상 물체인 무인잠수정은 수중을 운항하는 항체이다. 일반적으로 6개의 자유도를 가지는 수중 운동체는 12개의 상태 변수를 사용하여 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

선체 고정 좌표계의 중심이 부력 중심에 있고 이 부력 중심에 대해 잠수정은 x-y 평면과 x-z 평면에 대하여 대칭이므로 관성곱 I_{xy} , I_{yz} , I_{xz} 는 관성 I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} 에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 관성 모멘트의 값은 부록에 나타내었다. 이 때의 6자유도 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
m[(\dot{u}-vr+wq)-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})] &= \sum X \\
m[(\dot{v}-wp+ur)-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})] &= \sum Y \\
m[(\dot{w}-uq+pv)-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})] &= \sum Z \\
I_x\dot{p}+(I_z-I_y)qr-(\dot{r}+pq)I_{xz}+(r^2-p^2)I_{yz}+(pr-\dot{q})I_{xy} \\
+m[y_G(\dot{w}+pv-qu)-z_G(\dot{v}+ru-pw)] &= \sum K \\
I_y\dot{q}+(I_x-I_z)rp-(\dot{p}+qr)I_{xy}+(p^2-z^2)I_{yz}+(qp-\dot{r})I_{xy} \\
+m[z_G(\dot{u}+wq-vr)-x_G(\dot{w}+pv-uq)] &= \sum M \\
I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq-(\dot{q}+rp)I_{yz}+(q^2-p^2)I_{xy}+(rp-\dot{p})I_{zx} \\
+m[x_G(\dot{v}-wq+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)] &= \sum N
\end{aligned} \tag{3.5}$$

식(3.5)에서 우측의 항들은 항체에 작용하는 힘과 모멘트를 나타내며 부력과 중력 차이에 의한 힘과 모멘트, Added mass에 의한 힘과 모멘트, Drag에 의한 힘과 모멘트, 제어판(스턴, 러더)에 의한 힘과 모멘트, 추진기에 의한 힘과 모멘트를 말한다. 본 논문에서는 선형 관성력, 선형 감쇠, 비선형 감쇠와 관련된 유체력 계수를 고려하여 식(3.6) ~ 3(11)과 같이 유체력 모델을 구성하였다.

$$\sum X = X_{HS} + X_{uu}u^2 + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{prop} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
\sum Y &= Y_{HS} + Y_{vv}v^2 + Y_{rr}r^2 + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{\phi\phi} \\
&+ Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{u\delta_r}u^2\delta_r
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
\sum Z &= Z_{HS} + Z_{ww}w^2 + Z_{qq}q^2 + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp \\
&+ Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{u\delta_{tas}}u^2\delta_s
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\sum K = K_{HS} + K_{pp}p^2 + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
\sum M &= M_{HS} + M_{ww}w^2 + M_{qq}q^2 + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq \\
&+ M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{u\delta_{tas}}u^2\delta_s
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
\sum N &= N_{HS} + N_{vv}v^2 + N_{rr}r^2 + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur \\
&+ N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{u\delta_r}u^2\delta_r
\end{aligned} \tag{3.11}$$

3.2.2 외력

식 (3.6) ~ 식 (3.11) 는 무인잠수정이 수중에서 움직일 때 받는 힘과 모멘트를 나타낸다. 힘과 모멘트가 무인잠수정에 외력으로 작용하여 운동하게 된다. 외력은 다음과 같다.

1) Hydrostatic Force

유체 정역학적인 힘은 무게와 부력에 의해 생기는 힘이다. 중량 $W = mg$ 이고 부력 $B = \rho g V$ 이다. 이 때 m 은 선체의 질량, g 는 중력가속도, V 는 선체가 유체 속에서 차지하는 부피, ρ 는 유체의 밀도이다. 이때의 중력과 부력을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{HS} &= f_G - f_B \\ M_{HS} &= r_G \times f_G - r_B \times f_B \end{aligned} \quad (3.12)$$

무게와 부력은 Earth-fixed coordinate이고 외부 힘은 Body-fixed coordinate이므로 좌표 변환행렬 J 에 의해 변환될 수 있다.

$$f_G(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad f_B(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

좌표변환행렬 J 는 식 (3.14)과 같고 식 (3.12)에 대입하여 정리하면 식 (3.15)와 같다.

$$\begin{aligned} J_1(\eta_2) &= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \\ J_1^{-1}(\eta_2) &= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}
X_{HS} &= -(W - B) \sin \theta \\
Y_{HS} &= (W - B) \cos \theta \sin \phi \\
Z_{HS} &= (W - B) \cos \theta \cos \phi \\
K_{HS} &= -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi - (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\
M_{HS} &= -(z_g W - z_b B) \sin \theta - (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\
N_{HS} &= -(x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_b B) \sin \theta
\end{aligned} \tag{3.15}$$

2) Added mass에 의한 힘과 모멘트

어떤 물체가 유체 내에서 가속을 하게 되면 그 물체를 둘러싸고 있는 유체도 또한 가속이 된다. 따라서 물체와 함께 가속시켜줘야 하는 유체가 덧붙여져 질량이 커진 효과가 나타나게 되는데 이를 Added mass라고 한다. 공기 중이라면 공기밀도가 물체 밀도보다 매우 작기 때문에 무시할 수 있지만, 수중이라면 반드시 고려해줘야 한다. x-y평면과 x-z평면에 대칭인 선체에 대한 Added mass matrix를 구성하면 식 (3.16)과 같다.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

각 유체력 계수들은 VPMM(Vertical Plannar Motion Mechanism) 시험에 의해 구할 수 있으며 경험식 또는 추정식을 이용하여 구할 수도 있다. 본 논문에 쓰인 계수들은 Remus 유체력 계수들을 참고하였다.

3) Hydrodynamic Damping

물체가 유체 내에서 운동하거나 흐르는 유체 내에 물체가 정지해 있을 때 유체에 의해서 운동에 방해되는 힘을 받는데 이를 항력이라고 한다.

유체에 대한 물체의 상대속도(유체의 흐름을 따라 움직이는 관찰자가 본 물체의 속도)의 반대방향으로 항력이 작용한다.

항력의 크기 F_d 는 유체에 대한 상대 속력을 $v(m/s)$, 유체의 밀도를 $\rho (Kg/m^3)$, 물체의 단면적을 $A(m^2)$ 라고 할 때, 항력은 식 (3.17)과 같이 구성된다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \quad (3.17)$$

여기서 기준 면적 A 는 물체를 물체의 운동 방향에 수직한 평면에 투영한 면적과 관계된다. 그리고 C 는 물체형태나 표면의 상태에 의해서 결정되는 상수로 보통 이것을 항력계수(drag coefficient)라 한다. 항력 계수는 무차원 상수이며, 예를 들어 자동차에 대해서는 0.25 ~ 0.45의 값을 가진다. 항력은 hydrodynamic damping으로 나타낼 수가 있는데 아래와 같은 요소로 이루어진다.

$$D(v) = D_P(v) + D_S(v) + D_W(v) + D_M(v) \quad (3.18)$$

$D_P(v)$ = Radiation-induced potential damping due to forced body oscillations

$D_S(v)$ = Linear skin friction due to laminar boundary layers and quadratic skin friction due to turbulent boundary layers.

$D_W(v)$ = Wave drift damping

$D_M(v)$ = Damping due to vortex shedding

4) 제어판에 의한 힘과 모멘트

본 논문에서 사용된 무인잠수정에는 수직방향 위아래로 부착된 2개의 방향타와 수평방향 좌우로 부착된 2개의 방향타가 무인잠수정의 운동을 제어한다.

제어판에 작용하는 힘은 크게 항력과 양력으로 나눌 수 있으며 항력은 유체의 흐름과 평행하게 같은 방향이고 양력은 항력의 수직 방향이다. 양력은 식 (3.19)와 같이 나타낼수 있고 항력은 식 (3.20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A_{fin} \quad (3.19)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A_{fin} \quad (3.20)$$

(C_L : Lift Coefficient, ρ : Density of Fluid, V : Effective Velocity, A_{fin} : Area of Fin C_D : Drag Coefficient)

5) 추진력에 의한 힘과 모멘트

무인잠수정은 추진기 모터에 의해 움직이게 된다. 추진기의 주된 힘은 전진방향이며 스크류의 한 방향 회전에 의한 횡동요 모멘트만 작용한다. 모델링을 단순화시키기 위해 X_{prop} , K_{prop} 는 상수로 가정한다. 횡동요 모멘트는 좌우스텐에 적절한 각도를 주면 상쇄시킬 수 있다.

3.3 AUV의 3자유도 동역학 모델

3.3.1 수평면 운동 모델 선형화

수평면에서 움직이는 AUV의 운동은 Fig. 14와 같이 X축 방향으로의 Translational Motion(Surge), Y축 방향으로의 Translational Motion(sway)와 Z축 방향으로의 Rotational Motion(yaw)운동을 고려하게 된다. 그러므로 6자유도 운동과 달리 평면운동에서의 상태변수는 아래의 Table. 3과 같이 6개로 줄어들게 된다.

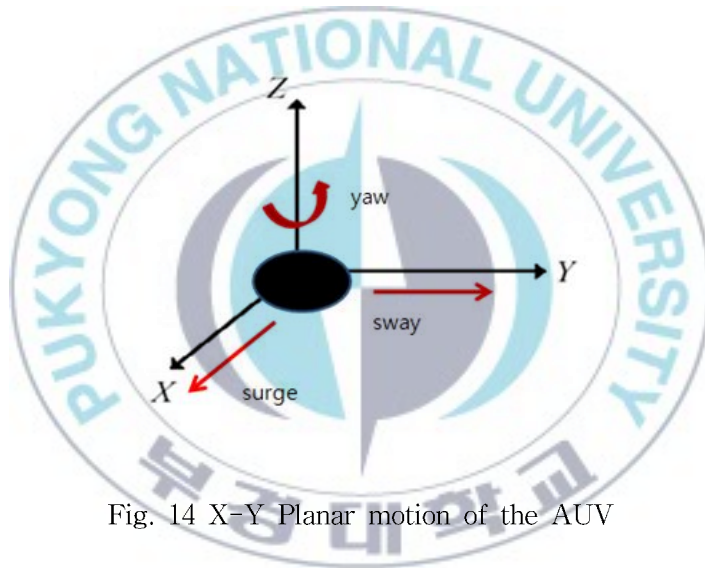


Fig. 14 X-Y Planar motion of the AUV

Table.3 Six state variables of an AUV with X-Y plane

DOF		Linear and angular velocity	Position and Euler angles
1	Motion in the x-direction (surge)	u	x
2	Motion in the y-direction (sway)	v	y
3	Motion in the z-direction (heave)	w	z
4	Rotate about the x-axis (roll)	p	Φ
5	Rotate about the y-axis (pitch)	q	Θ
6	Rotate about the z-axis (yaw)	r	Ψ

Surge, sway, yaw운동만 있으므로 나머지 요소 Heave, roll, pitch요소는 무시할 수 있다. 또 선체 고정 좌표계의 중심이 부력 중심에 있고 이 부력 중심에 대해 잠수정은 x-y 평면과 x-z 평면에 대하여 대칭이므로 관성곱 I_{xy}, I_{yz}, I_{xz} 는 관성 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 또 무인잠수정의 무게중심은 $CG=[x_G, y_G, z_G]=[0 \ 0 \ 0.02m]$ 이므로 식 (3.21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} w &= p = q = 0 \\ I_{xy} &= I_{yz} = 0 \\ x_G &= y_G = 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

앞장에서 기술한 6자유도 운동방정식을 위에서 기술한 요소들을 적용해서 단순화시키면 (3.22)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= \sum X \\ m(\dot{v} + ur) &= \sum Y \end{aligned}$$

$$I_{zz}\dot{r} = \sum N \quad (3.22)$$

하지만 수평면 운동을 할 때 옆으로 밀리는 좌우 동요 속도(Sway velocity) v 는 무시할 수 있으므로 선체 고정 좌표계의 z 방향 모멘트인 N 성분만이 수평면 운동에 주된 영향을 미친다. z 방향 모멘트 성분인 N 은 (3.23)과 같다.

$$\begin{aligned} I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} - w p + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = \\ N_{HS} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} \\ + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \end{aligned} \quad (3.23)$$

하지만 수평면 운동에서는 부력과 중력 차이에 의한 성분이 없고 고차항을 무시하며 커플링 항을 무시하면 Added mass 에 의한 성분도 소거된다. 그러므로 (3.25)와 같이 수평면 운동에 필요한 성분만 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} - w p + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = \\ N_{HS} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} \\ + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$(I_{zz} - N_r)\dot{r} = N_r r + N_{\delta_r} \delta_r$$

$$\dot{\psi} = r \quad (3.25)$$

3.3.2 수직면 운동

XZ평면에서만 움직이는 AUV의 운동은 Fig. 15와 같이 X축 방향으로의 Translational Motion(Surge), Z축 방향으로의 Translational Motion(heave)와 Y축 방향으로의 Rotational Motion(pitch)운동만을 고려하게 된다.

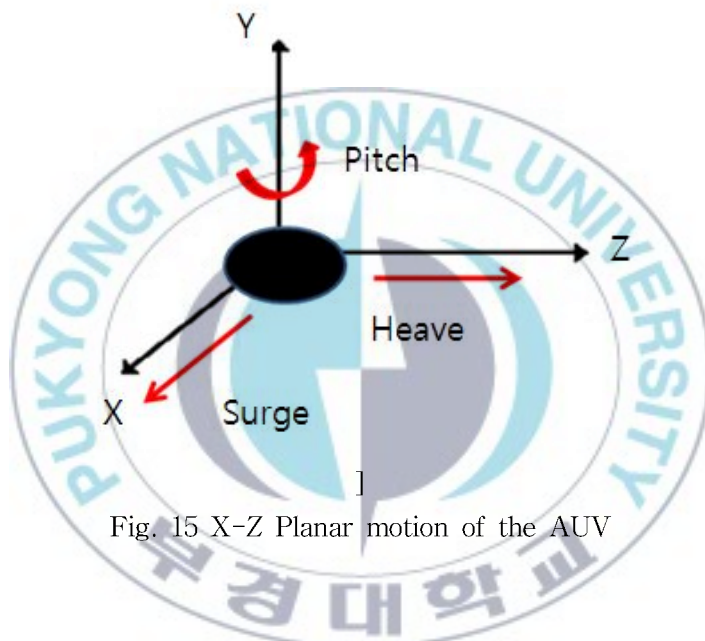


Fig. 15 X-Z Planar motion of the AUV

그러므로 6자유도 운동과 달리 수직운동에서의 상태변수는 아래의 Table. 4와 같이 6개로 줄어들게 된다.

Table. 4 Six state variables of an AUV with X-Z plane

DOF		Linear and angular velocity	Position and Euler angles
1	Motion in the x-direction (surge)	u	x
2	Motion in the y-direction (sway)	v	y
3	Motion in the z-direction (heave)	w	z
4	Rotate about the x-axis (roll)	p	Φ
5	Rotate about the y-axis (pitch)	q	Θ
6	Rotate about the z-axis (yaw)	r	Ψ

Surge, heave, pitch 운동만 있으므로 나머지 요소 sway, roll, yaw요소는 무시할 수 있다. 또 XZ-Plane이 좌우대칭이고 좌표계가 AUV의 무게 중심에 있다고 가정하면 세 가지 항을 무시할 수 있다. 선체 고정 좌표계의 중심이 부력 중심에 있고 이 부력 중심에 대해 잠수정은 x-y 평면과 x-z 평면에 대하여 대칭이므로 관성곱 I_{xy}, I_{yz}, I_{xz} 는 관성 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 에 비해 매우 작아 무시할 수 있다.

무인잠수정의 무게중심은 $CG = [x_G, y_G, z_G] = [0 \ 0 \ 0.02m]$ 이므로 식 (3.26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 v &= p = r = 0 \\
 I_{xz} &= I_{zy} = 0 \\
 x_G &= y_G = 0
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

앞장에서 기술한 6자유도 운동방정식을 위에서 기술한 요소들을 적용해서 단순화시키면 식 (3.27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
m(\dot{u} + wq + z_G \dot{q}) &= \sum X \\
m(\dot{w} - uq - z_G \dot{q}^2) &= \sum Z \\
I_{yy} \dot{q} + m[z_G(\dot{u} + wq)] &= \sum M
\end{aligned} \tag{3.27}$$

하지만 수직면 운동을 할 때 상하로 밀리는 상하 동요 속도(Heave velocity) w 는 무시할 수 있으므로 선체 고정 좌표계의 y 방향 모멘트인 M 성분만이 수직면 운동에 주된 영향을 미친다. y 방향 모멘트 성분인 M 은 식(3.28)과 같다.

$$\begin{aligned}
I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= \\
M_{HS} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_w \dot{w} + M_q \dot{q} & \\
+ M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s &
\end{aligned} \tag{3.28}$$

하지만 수직면 운동에서는 부력과 중력 차이에 의한 성분이 간략화 될 수 있고 고차항을 무시하며 커플링 항을 무시하면 Added mass 에 의한 성분도 소거된다. 그러므로 (3.30)과 같이 수직면 운동에 필요한 성분만 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned}
I_{yy} \dot{q} + (\cancel{I_{xx}} - \cancel{I_{zz}})rp + m[\cancel{z_g}(\dot{u} - \cancel{vr} + wq) - \cancel{x_g}(\dot{w} - \cancel{uq} + \cancel{vp})] &= \\
M_{HS} + \cancel{M_{w|w}|w|} + \cancel{M_{q|q}|q|} + \cancel{M_w \dot{w}} + \cancel{M_q \dot{q}} & \\
+ \cancel{M_{uq}uq} + \cancel{M_{vp}vp} + \cancel{M_{rp}rp} + \cancel{M_{uw}uw} + \cancel{M_{uu\delta_s}u^2\delta_s} &
\end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
(I_{yy} - M_q) \dot{q} &= M_q q - z_G W \dot{\theta} + M_{\delta_s} \delta_s \\
\dot{\theta} &= q
\end{aligned} \tag{3.30}$$

3.4 AUV의 수중항력 계수

3.4.1 항력과 항력계수

물체가 유체 내에서 운동하거나 흐르는 유체 내에 물체가 정지해 있을 때 유체에 의해서 운동에 방해되는 힘을 받는데 이를 항력이라고 한다. 유체에 대한 물체의 상대속도(유체의 흐름을 따라 움직이는 관찰자가 본 물체의 속도)의 반대방향으로 항력이 작용한다.

항력의 크기 F_d 는 유체에 대한 상대속도를 v (m/s), 유체의 밀도를 ρ (kg/m³), 물체의 단면적을 A (m²)라고 할 때, 식 (3.31)과 같다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 [N] \quad (3.31)$$

여기서 기준 면적 A 는 물체를 물체의 운동 방향에 수직한 평면에 투영한 면적과 관계된다. 그리고 C_d 는 물체형태나 표면의 상태에 의해서 결정되는 상수로 보통 이것을 항력계수(drag coefficient)라 한다. 항력 계수는 무차원 상수이며, 예를 들어 자동차에 대해서는 0.25 ~ 0.45의 값을 가지며 위 식을 항력계수에 대한 식으로 변환하면 식 (3.32)와 같다.

$$C_d = \frac{2F}{\rho A v^2} \quad (3.32)$$

항력계수는 단면적과 속도에 따라 달라지므로 AUV의 운동성능에 영향을 준다. 그러므로 본 논문에서는 실험을 통한 항력계수를 얻어서 보다 정확한 시뮬레이션 결과를 도출한다.

3.4.2 항력계수 시험

시험은 수산과학원 회류시험수조에서 하였으며 수조 왼쪽에 있는 대형 프로펠러가 일정 유속을 만들어내면 인장형 로드셀이 AUV에 걸리는 장력을 측정하는 방식으로 시험하였으며 전면항력계수 측정을 위한 전면부 시험과 측면항력계수 측정을 위한 측면부 시험으로 나누어 시험하였고 시험방식은 Fig. 16과 같고 Fig. 17은 실제 시험하는 장면을 나타내고 있다.



Fig. 16 항력계수 측정시험개념

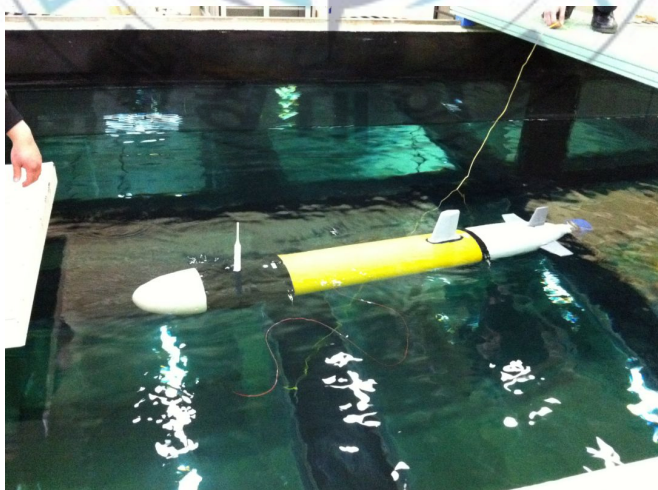


Fig. 17 항력계수 도출 시험 장면

전면부 시험은 유속 0.8m/s에서 1.6m/s까지 0.2m/s씩 증가시키면서 항력계수를 측정하였고 계산결과 약 0.4정도의 항력계수를 도출해 낼 수 있었다. 측면부 시험은 유속 0.2m/s부터 0.8m/s 까지 0.2m/s씩 증가시키면서 항력계수를 측정하였고 계산결과 약 0.84정도의 항력계수를 도출해 내었다.



제 4 장 AUV의 운동 제어기 설계

4.1 PD제어 및 슬라이딩 모드 제어

무인 잠수정의 제어에 적용한 제어 알고리즘에 대해 고찰하고자 한다. 수학적 모델의 유체력 모델링 부분에서 선형관성력 계수, 선형 감쇠 계수, 비선형 댐핑 계수 등을 모두 고려한 정밀한 수학적 모델링을 수행하였다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 비선형 댐핑 계수의 경우 조종 성능에 미치는 영향이 미미하다고 알려져 있고, 그 크기가 선형 관성력이나 선형 점성에 비해 아주 작고, 또한 제어기 설계를 간단하게 하기 위하여 제어기 설계에서 고려하지 않았다. 따라서 실제의 무인잠수정과 제어기 설계를 위한 간략화 된 수학적 모델 사이에는 비선형 감쇠계수를 포함하지 않은 부분에 기인하는 모델링 오차가 약간 발생하게 된다. 이러한 모델링 오차를 잘 극복하는 것으로 알려진 비선형 제어기법이 슬라이딩 모드 제어기이다. 본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 제어기를 설계함으로써 안정성이 보장된 강인 제어 알고리즘을 구현하고 일반적으로 많이 쓰이는 제어 변수와 기준 입력 사이의 오차에 근거하여 계통의 출력을 제어하는 피드백 제어의 일종인 PD제어기를 설계하여 두 제어기의 결과를 비교 할 것이다. 제어기는 수직면 운동과 수평면 운동을 분리시켜 수직면 제어기와 수평면 제어기로 나누어 구성하였다. 시뮬레이션은 무인잠수정의 비선형 수학 모델에 수평면, 수직면에 대해 독립적으로 설계된 제어 알고리즘을 통해 요구되는 추진기 제어 입력, 제어날개 각도를 계산하도록 함으로써 수행하였고 유체력 계수들은 Remus 계수들을 참고하였고 부록에 나타내었다.

4.1.1 PD제어

방향 제어를 위해 PD 제어기를 설계한다. 비례-적분-미분 제어기(PID 제어기)는 실제 응용분야에서 가장 많이 사용되는 대표적인 형태의 제어 기법이다. PID 제어기는 기본적으로 피드백(feedback)제어기의 형태를 가지고 있으며, 제어하고자 하는 대상의 출력값(output)을 측정하여 이를 원하고자 하는 참조 값(reference value) 혹은 설정 값(setpoint)과 비교하여 오차(error)를 계산하고, 이 오차 값을 이용하여 제어에 필요한 제어 값을 계산하는 구조로 되어 있다. 무인 잠수정에 적용하여 러더 방향타를 입력 값 으로 주고 대상의 출력 값을 무인잠수정의 z 방향 회전각 ψ 으로 한다. 입력 값과 출력 값에 따른 PD 제어기는 식 (4.1)와 같다.

$$\delta_r = K_p(\psi_d - \psi) - K_d\dot{\psi} \quad (4.1)$$

계산된 제어 값이 실제 구동기(actuator)가 작용할 수 있는 값의 한계보다 커서 구동기의 포화(saturation)가 발생하게 되는 경우, 오차의 적분 값이 큰 값으로 누적되게 되어서, 정작 출력 값이 설정 값에 가까지게 되었을 때, 제어 값이 작아져야 함에도 불구하고 계속 큰 값을 출력하게 되어 시스템이 설정 값에 도달하는 데 오랜 시간이 걸리게 되는 경우가 있는데, 이를 적분기의 와인드업이라고 한다. 이를 방지하기 위해서는 적절한 안티 와인드업(Anti-windup) 기법을 이용하여 PID 제어기를 보완해야 한다. 본 논문에서는 적분기 와인드업을 피하기 위하여 적분 제어기를 포함시키지 않은 PD제어기를 사용한다.

4.1.2 슬라이딩 모드 제어

비선형 제어 설계 기법 중 모델링 오차에 기인하는 부분을 고려할 수 있는 고전적인 비선형 제어 기법이 슬라이딩 모드 제어기이다. 슬라이딩 모

드 제어기법에 대해서는 Utkin의 1992년 논문에 자세히 다루어져 있으며, Yogger와 Slotine는 1985년 연구에서 ROV의 운동 제어에 슬라이딩 모드 제어기법을 적용한 바 있으며, Cristi (1990) 등은 무인잠수정의 수직면 운동에 슬라이딩 모드 제어를 적용한 바 있다.

$$\dot{x} = Ax + bu + f(x, t) \quad (4.2)$$

여기서 $f(x, t)$ 는 외란과 모델링되지 않은 동역학 등을 고려한 선형모델로부터의 차이를 나타내는 비선형 함수이다. x 는 상태 변수를 나타내며, u 는 제어 입력을 나타낸다. 피드백 제어 입력은 다음과 같이 두 가지 부분으로 구성되어 산출 된다.

$$u = -k^T x + u_0 \quad (4.3)$$

여기서 k 는 피드백 게인을 나타내는 벡터이다. 식(4.3)를 (4.2)에 대입하면 다음과 같은 폐 루프의 동역학을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - bk^T)x + bu_0 + f(x, t) \\ A_c &= A - bk^T \end{aligned} \quad (4.4)$$

여기서 게인 k 는 pole-placement를 통하여 계산된다. 피드백 컨트롤 법칙의 비선형 부분에 해당하는 u_0 를 계산하기 위하여 식 (4.4)와 같은 output mapping 을 고려한다.

$$\sigma(\tilde{x}) = h^T \tilde{x} \quad (4.5)$$

여기서 h 는 $\sigma(\tilde{x}) \rightarrow 0$ 이 되도록 선택된다. 이는 상태 변수의 추종 오차가 $\tilde{x} = x - x_d \rightarrow 0$ 이 되게 함을 의미한다. Output mapping $\sigma(\tilde{x})$ 는 또한 슬라이딩 표면이라고도 일컬어진다. 식 (4.4)의 앞쪽에 h^T 를 곱하고 양 변에서 $h^T \dot{x}_d$ 를 빼주면 다음의 식과 같다.

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x + h^T b u_0 + h^T f(x, t) - h^T \dot{x}_d \quad (4.6)$$

$h^T b \neq 0$ 이라고 가정하면 비선형 제어 입력 u_0 은 다음과 같이 계산된다.

$$u_0 = (h^T b)^{-1} [h^T \dot{x}_d - h^T \hat{f}(x, t) - \eta \operatorname{sgn}(\sigma)], \quad \eta > 0 \quad (4.7)$$

여기서 $\hat{f}(x, t)$ 는 $f(x, t)$ 의 추정치이다. 이로부터 다음의 σ 에 관한 동역학식을 구할 수 있게 된다.

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x - \eta \operatorname{sgn}(\sigma(\tilde{x})) + h^T \Delta f(x, t) \quad (4.8)$$

여기에서 $\Delta f(x, t) = f(x, t) - \hat{f}(x, t)$ 이다. (4.6)식의 첫 번째 항은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$h^T A_c x = x^T A_c^T h = \lambda x^T h \quad (4.9)$$

h 를 A_c^T 의 Right eigen vector로 두면

$$(A_c^T)h = \lambda h \quad (4.10)$$

여기에서 $\lambda = \lambda(A_c^T)$ 는 h 에 대응되는 eigen value이다. 따라서

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = \lambda x^T h - \eta \operatorname{sgn}(\sigma(\tilde{x})) + h^T \Delta f(x, t) \quad (4.11)$$

식 (3.11)에서의 λ 값 중 하나는 대부분의 상태 공간 모델에서 2차의 운동 방정식을 1차의 연립 운동방정식으로 바꾸는 과정에서 나타나게 되는 순수한 정수 1을 포함하는 경우가 많으므로 0이 될 수 있다. 따라서

$$\lambda x^T h = 0 \quad \text{if } h \text{ is a right eigenvector of } A_c^T \text{ for } \lambda = 0 \quad (4.12)$$

h 를 위와 같이 선택함으로써 σ 에 관한 동역학식은 식 (4.13)과 같이 간단하게 된다.

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = -\eta \text{sgn}(\sigma(\tilde{x})) + h^T \Delta f(x, t) \quad (4.13)$$

그리고 Lyapunov 함수를 다음의 형태로 놓으면

$$V(\sigma) = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, t) &= \sigma \dot{\sigma} \\ &= -\eta \sigma \text{sgn}(\sigma) + \sigma h^T \Delta f(x, t) \\ &= -\eta |\sigma| + \sigma h^T \Delta f(x, t) \end{aligned} \quad (4.15)$$

이 된다.

한편 η 를 다음과 같이 놓으면

$$\eta = \|h\| \cdot \|\Delta f(x, t)\| \quad (4.16)$$

다음과 같이 안정성을 보장하게 된다.

$$\dot{V} \leq 0 \quad (4.17)$$

따라서 η 를 식 (4.16)에서와 같이 모델링 되지 않은 오차 $\Delta f(x, t)$ 를 극복할 수 있도록 충분히 크게 잡아준다면 Barbălat's lemma에 의해 σ 는 유한 시간에 0으로 수렴한다는 것을 보장할 수 있다. η 의 크기는 강인성과 성능 사이에서 상충되는 부분이므로 적절히 잡아줄 필요가 있다. 슬라이딩 모드 제어기의 실질적으로 구현하는 과정에서 채터링(chattering)이 발생하므로 $\text{sgn}(\sigma)$ 를 다음과 같이 대치함으로써 적절하게 제거할 수 있다.

$$\text{sat}(\sigma) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma) & \text{if } |\sigma/\phi| > 1 \\ \sigma/\phi & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.18)$$

여기에서 설계 변수인 ϕ 는 슬라이딩 표면의 경계층 두께(boundary layer thickness)이다. 식 (4.18)의 불연속 함수는 연속함수인 $\tanh(\sigma/\phi)$ 로 대체가 가능하다. 지금까지 일련의 과정을 통하여 제안된 슬라이딩 모드 피드백 제어 알고리즘은 η 를 튜닝 변수(tunable parameter)로 조정함으로써 플랜트를 안정화시키는 데 필요한 제어 입력을 안정적으로 추정할 수가 있게 된다.

4.2 수평면 방향 제어기 설계

4.2.1 PD제어

3.3.1장에서 기술한 수평면 운동 모델 선형화를 거친 3자유도 운동방정식을 다시 나타내면 식 (4.19) ~ 식 (4.20)과 같다.

$$(I_{zz} - N_r) \dot{r} = N_r r + N_{\delta_r} \delta_r \quad (4.19)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (4.20)$$

PD 제어기를 설계하기 위해서 입력 값과 출력 값에 대한 전달함수를 구한다. 그리고 이 전달함수로부터 PD Gain 값을 도출한다. Vector Form과 상태 공간형식(State-space form)으로 나타내면 식 (4.23)과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_{zz} - N_r} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.23)$$

수치를 참고하여 대입하면 식 (4.24)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8247 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.7383 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.24)$$

주어진 시스템이 가제어성인지 확인한다. 제어기를 설계하여 주어진 시스템을 제어할 수 있는지를 파악하기 위해서는 먼저 가제어성 행렬(Controllability matrix)을 계산해 봐야 한다.

가제어성 행렬 $S = [B, AB, A^2B, A^3B, \dots, A^{n-1}B]$ 일 때 $\text{rank}(S) \geq n$ 이면 제어 가능이고 $\text{rank}(S) < n$ 이면 제어 불가능이다. 이때 n 은 시스템의 차수를 나타내는 A, B 행렬의 행의 수이다. 이 시스템의 경우에는 $n=2$ 이므로 $S = [B, AB]$ 가 된다. Matlab을 사용해 계산해보면 $\text{Rank}(S)=2$ 이므로 가제어 상태임을 알 수 있고 제어기를 설계하여 제어할 수 있다. 위 식으로부터 게루프 전달 함수를 구해보면 식 (4.25)와 같다.

$$G = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{\frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r}}{s(s - \frac{N_r}{I_{zz} - N_r})} = \frac{-0.7383}{s(s + 0.8247)} \quad (4.25)$$

PD 제어기와 시스템의 블록선도는 Fig. 18과 같다.

$$\delta_r = K_p(\psi_d - \psi) - K_d\dot{\psi} \quad (4.26)$$

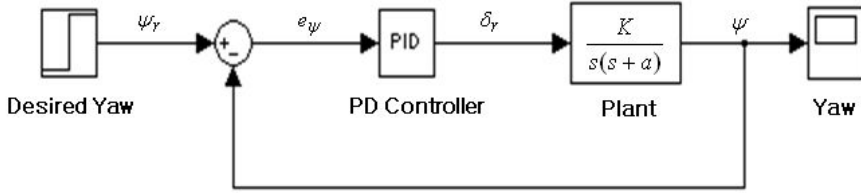


Fig. 18 Heading Control System Block Diagram

시스템의 폐루프 전달 함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{-0.7383(K_p + K_d s)}{s^2 + (0.8247 - 0.7383K_d)s - 0.7383K_p} \quad (4.27)$$

Ackermann's 공식을 사용하여 시스템이 원하는 극을 가지도록 하는 제어이득 K를 계산한다. Ackermann's 공식에 의한 제어 이득 K는 다음과 같다.

$$K = [0, 1][B, AB]^{-1}\phi(A) \quad (4.28)$$

이 때 $\phi(A)$ 는 $\phi(s)$ 를 원하는 극으로 이루어진 특성 방정식이라고 할 때 s 대신 A를 대입한 값이다. $\phi(A)$ 를 구하기 전에 먼저 원하는 극으로 이루어진 특성 방정식 $\phi(s)$ 를 결정한다. Settling time 과 감쇠비를 이용하면 2차시스템의 경우 Settling time을 5초라고 하고 OS를 5%까지 허용하면 감쇠비는 Table. 5와 같다.

$$\zeta = \frac{-\ln(\frac{\%OS}{100})}{[\pi^2 + \ln^2(\frac{\%OS}{100})]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.29)$$

Table .5 OS에 따른 감쇠비

%OS	5	10	15	20	25	30
ζ	0.690	0.591	0.517	0.456	0.404	0.358

감쇠비 $\zeta = 0.690$ 이면 Settling time $t_s = \frac{4}{\zeta w_n} = 5$ 이므로 고유진동수 $w_n = 1.1594$ 가 된다. 따라서 감쇠비와 고유 진동수를 특성 방정식 공식 $\phi(s) = s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$ 에 대입하면 특성 방정식은 $\phi(s) = s^2 + 1.6s + 1.3442$ 이 된다. 특성 방정식의 근이 시스템의 근이 되므로 특성 방정식의 근을 구하면 다음과 같다.

```
>> Phi=[1, 1.6, 1.3442];
>> roots(Phi)
```

ans =

```
-0.8000 + 0.8392i
-0.8000 - 0.8392i
```

구한 2개의 극은 $-0.8 + 0.8392i$, $-0.8 - 0.8392i$ 이 되므로 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\phi(s) = s^2 + 1.6s + 1.3442$$

$\phi(A) = A^2 + 1.6A + 1.3442$ 이 되므로 이 값을 polyvalm을 사용하여 계산하면 다음과 같다.

```
>> fA=polyvalm(f, A)
```

fA =

```
0.7049    0
0.7753    1.3443
```

이제 Ackermann's 공식을 사용하여 제어 이득 K를 계산한다. n이 2이므로 Ackermann's 공식은 다음과 같다.

$$K = [0, 1][B, AB]^{-1}\phi(A) = [0, 1][S]^{-1}\phi(A) \quad (4.30)$$

```
>> K=[0,1]*inv(S)*fA
```

```
K =
```

```
 -1.0501   -1.8207
```

그러므로 $K_p = -1.0501$, $K_d = -1.8207$ 이다.



4.2.2 슬라이딩 모드 제어

3.3.1장에서 기술한 수평면 운동 모델 선형화를 거친 3자유도 운동방정식을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$(I_{zz} - N_r) \dot{r} = N_r r + N_{\delta_r} \delta_r \quad (4.31)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (4.32)$$

슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위해서 입력값과 출력값에 대한 전달함수를 구한다. 그리고 이 전달함수로부터 슬라이딩 모드 Gain 값을 도출한다. Vector Form 과 상태 공간형식(State-space form) 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.33)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.34)$$

계산해주면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_{zz} - N_r} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.35)$$

수치를 참고하여 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8247 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.7383 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.36)$$

주어진 시스템이 가제어성인지 확인한다. 제어기를 설계하여 주어진 시

시스템을 제어할 수 있는 지를 파악하기 위해서는 먼저 가제어성 행렬(Controllability matrix)을 계산해 봐야 한다. 가제어성 행렬

$S = [B, AB, A^2B, A^3B, \dots, A^{n-1}B]$ 일 때 $\text{rank}(S) \geq n$ 이면 제어 가능이고 $\text{rank}(S) < n$ 이면 제어 불가능이다. 이때 n 은 시스템의 차수를 나타내는 A, B 행렬의 행의 수이다. 이 시스템의 경우에는 $n=2$ 이므로 $S = [B, AB]$ 가 된다. Matlab을 사용해 계산해보면 $\text{Rank}(S)=2$ 이므로 가제어 상태임을 알 수 있고 제어를 설계하여 제어할 수 있다. 위 식으로부터 개루프 전달 함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{\frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r}}{s(s - \frac{N_r}{I_{zz} - N_r})} = \frac{-0.7383}{s(s + 0.8247)} \quad (4.37)$$

수평방향에 대한 제어법칙을 구해보면 다음과 같다.

$$u_h(t) = -k^T x(t) - [s^T b]^{-1} s^T \dot{f}(t) + [s^T b]^{-1} s^T \dot{x}(t)_{com} - [s^T b]^{-1} \eta \text{sgn}(\sigma) \quad (4.38)$$

위 식을 구하기 위해 Pole placement method를 써서 궤환시스템의 게인 벡터인 k 를 구해보자. 상태방정식으로부터 PD제어기에서 구한 극점을 이용해 Matlab 함수인 place를 써서 K 를 구하면 $K_p = -1.0501$, $K_d = -1.8207$ 이다. Closed loop dynamics matrix에서 슬라이딩 모드제어기의 $A_c = A - B \cdot k$ 이고 A_c 로부터 슬라이딩 계수 s 가 정해진다. 상태방정식의 상태 매트릭스와 구한 K 게인값을 이용하여 슬라이딩 모드 계수를 구해보면 $s_1=0.45$, $s_2=0.75$ 가 나오므로 구한 계수들을 사용하여 수평방향에 대한 제어법칙을 구해보면 다음과 같다.

$$\delta_r = 1.0501r - 3.03\eta \tanh\left(\frac{0.45r + 0.75(\psi - \psi_{com})}{\phi}\right) \quad (4.39)$$

PD제어기와 동일한 극점은 $-0.8 + 0.8392i$, $-0.8 - 0.8392i$ 이며 스위칭게인 η 와 채터링제거를 위한 경계층 두께 ϕ 는 시행착오법으로 결정하였다.

4.2.3 PD제어와 슬라이딩 모드 제어의 비교

Fig. 20은 4.21장에서 구한 K_p 와 K_d 값을 사용하여 90도 선회명령을 계단 입력으로 주었을 때의 반응을 시뮬레이션 한 결과이다. 프로그램은 Matlab Simulink를 사용하였고 시뮬링크 코딩은 Fig. 19와 같다.

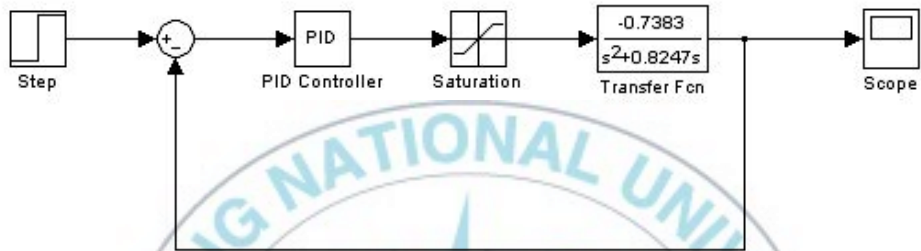


Fig. 19 Heading Control Block diagram using Simulink

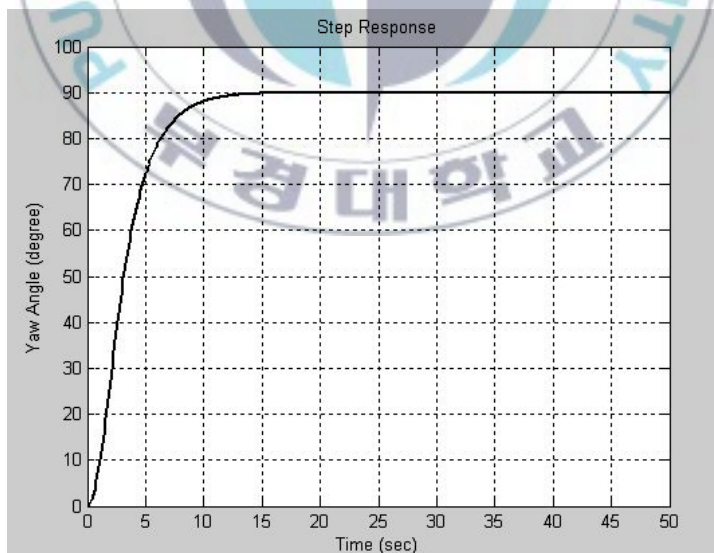


Fig. 20 Step Response ($K_p = -1.0501$, $K_d = -1.8207$)

오버슈트가 발생하지 않고 목표 추종치 값에 잘 추종하고 있으나 정착시간이 너무 길다. Fig. 21은 K_p 를 증가시켜서 정착시간을 줄여본 그래프이다.

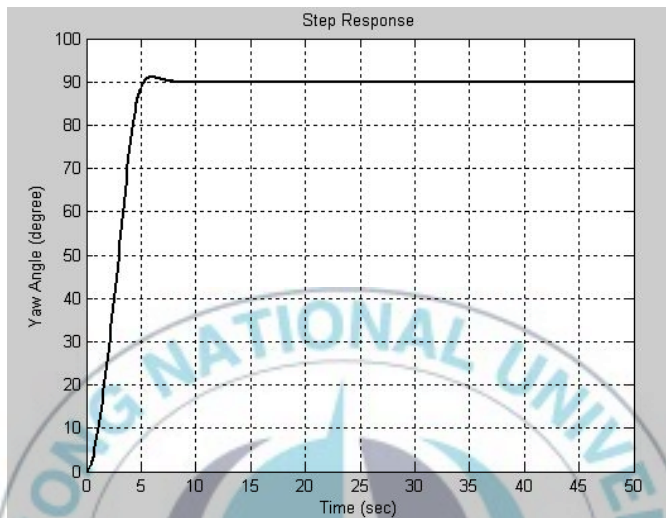


Fig. 21 Step Response ($K_p=-3$, $K_d = -1.8207$)

4.2.1 장과 4.2.2 장에서 구한 PD제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 수평방향 스텝입력의 응답을 비교해 보았다. 스텝입력은 30도, 60도, 90도로 증가시켜가며 비교해보았고 시간에 따른 Yaw angle을 Fig. 22, Fig. 25, Fig. 28에 나타내었다.

1) Yaw angle = 30도

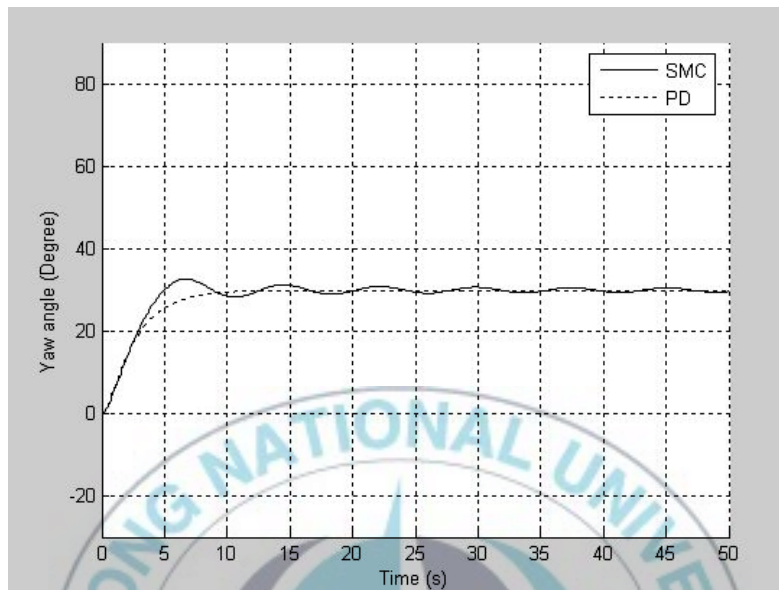


Fig. 22 시간에 따른 Yaw angle

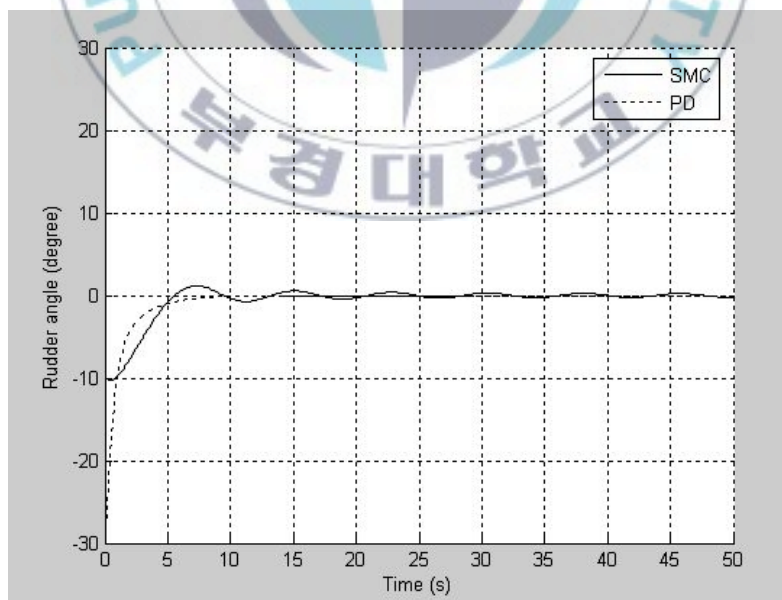


Fig. 23 시간에 따른 Rudder angle

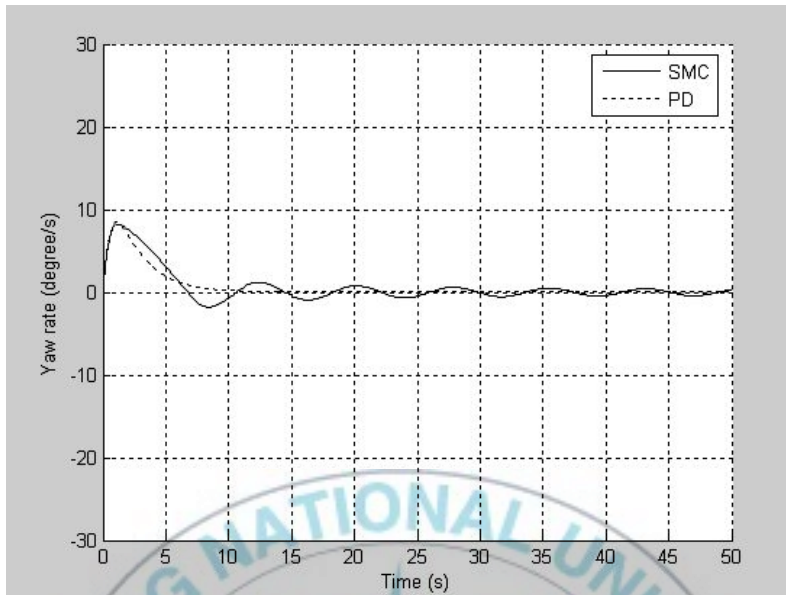


Fig. 24 시간에 따른 Yaw angle rate

Table. 6 PD Controller 과 Sliding mode Controller 비교

PD Controller		Sliding mode Controller	
Settling time	8.7 (s)	Settling time	8.9 (s)
Overshoot	0 (%)	Overshoot	11.6 (%)
Rising Time	5.1 (s)	Rising Time	5.3 (s)
Final value	30 (degree)	Final value	30(degree)

2) Yaw angle = 60도

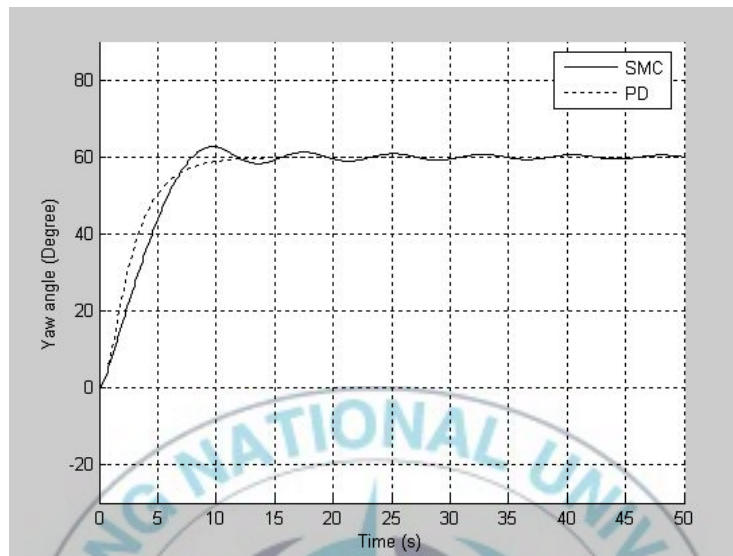


Fig. 25 시간에 따른 Yaw angle

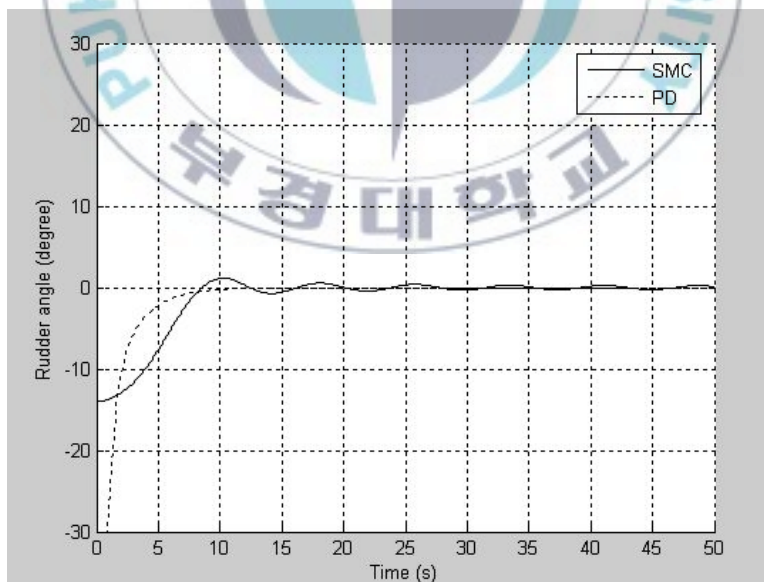


Fig. 26 시간에 따른 Rudder angle

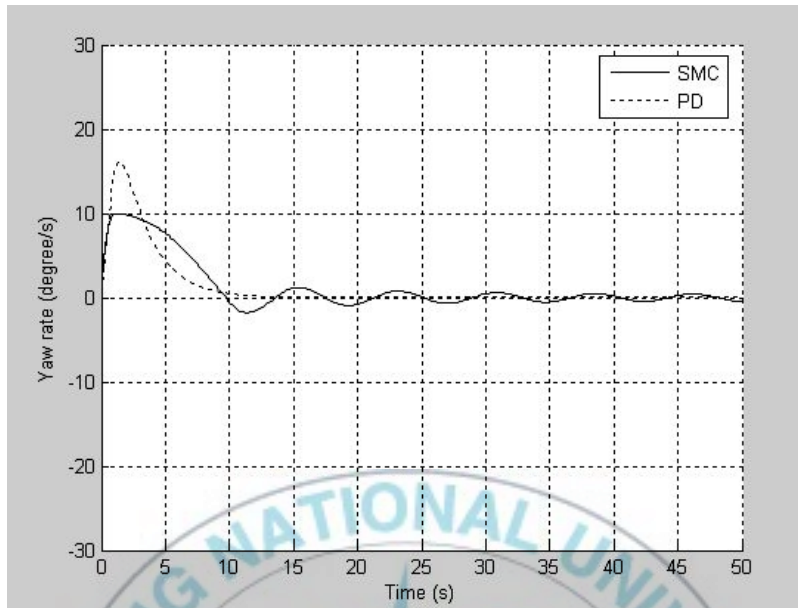


Fig. 27 시간에 따른 Yaw angle rate

Table. 7 PD Controller 과 Sliding mode Controller 비교

PD Controller		Sliding mode Controller	
Settling time	12.4 (s)	Settling time	11.3 (s)
Overshoot	0 (%)	Overshoot	5 (%)
Rising Time	7.8 (s)	Rising Time	7.4 (s)
Final value	60 (degree)	Final value	60 (degree)

3) Yaw angle = 90도

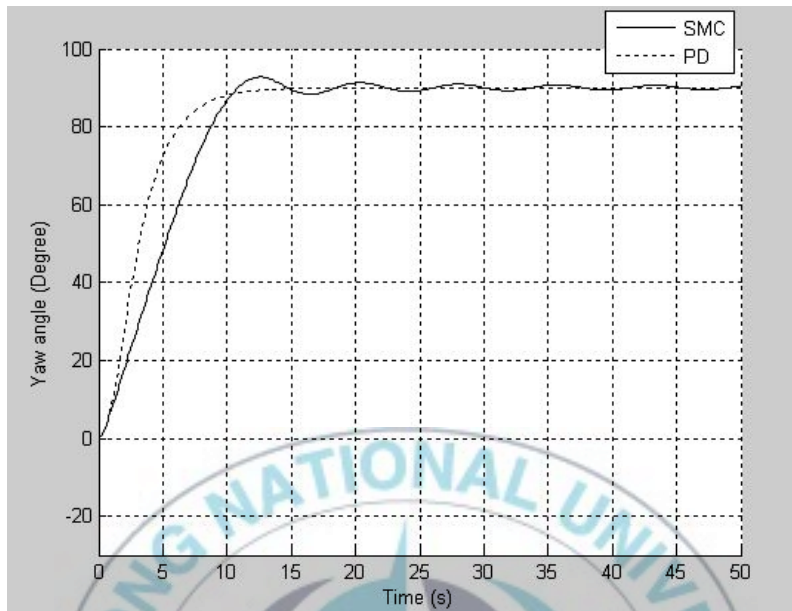


Fig. 28 시간에 따른 Yaw angle

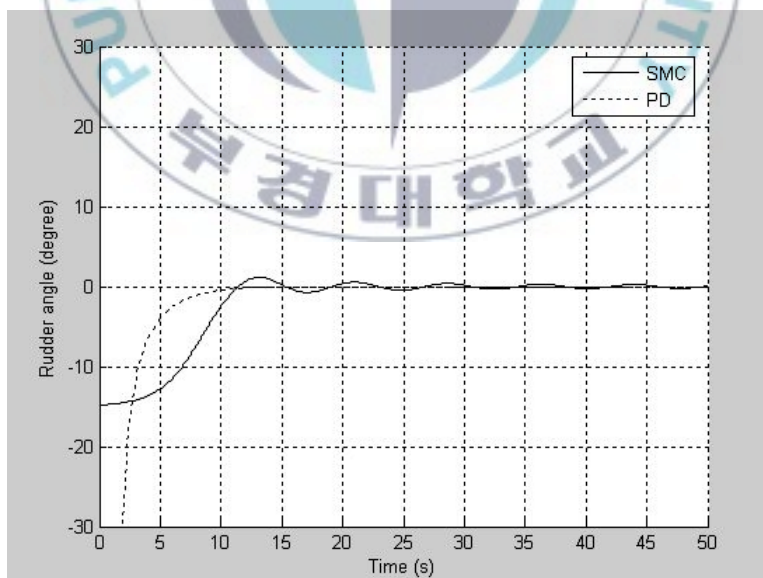


Fig. 29 시간에 따른 Rudder angle

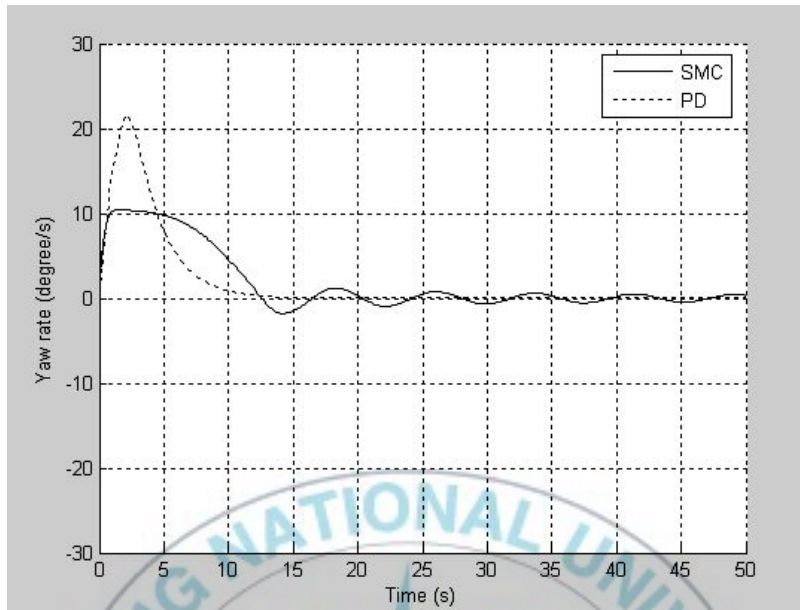


Fig. 30 시간에 따른 Yaw angle rate

Table. 8 PD Controller 과 Sliding mode Controller 비교

PD Controller		Sliding mode Controller	
Settling time	12 (s)	Settling time	14.3 (s)
Overshoot	0 (%)	Overshoot	4.4 (%)
Rising Time	7.5(s)	Rising Time	9.1 (s)
Final value	90 (degree)	Final value	90 (degree)

4.3 수직면 방향 제어기 설계

4.3.1 PD제어

3.3.2장에서 기술한 수직면 운동 모델 선형화를 거친 3자유도 운동방정식을 다시 나타내면 식 (4.40) ~ (4.41)과 같다.

$$(I_{yy} - M_q)\dot{q} = M_q q - z_G W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \quad (4.40)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (4.41)$$

$$\dot{z} = -U \theta \quad (4.42)$$

PD 제어기를 설계하기 위해서 입력 값과 출력 값에 대한 전달함수를 구한다. 그리고 이 전달함수로부터 PD Gain 값을 도출한다. Vector Form 과 상태 공간형식(State-space form) 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_q & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q & z_G W \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\delta_s} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (4.43)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8247 & -1.1749 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.1537 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (4.44)$$

```
>> S=[B, A*B]
```

```
S =
```

```

-4.1537    3.4256
      0    -4.1537
```

```
>> rank(S)
```

```
ans =
```

```
2
```

이 시스템은 제어가능하다. 위의 식으로부터 개루프 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G_{Plant} = \frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{\frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q}}{s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q}s + \frac{z_G W}{I_{yy} - M_q}} = \frac{-4.1537}{s^2 + 0.8247s + 1.1749} \quad (4.45)$$

위의 값이 제어기는 스티븐 방향타에 따른 종동요각과 스티븐방향타에 따른 무인잠수정의 값으로 나눌 수 있다.

$$G_\theta = \frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{\frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q}}{s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q}s + \frac{z_G W}{I_{yy} - M_q}} = \frac{-4.1537}{s^2 + 0.8247s + 1.1749} \quad (4.46)$$

$$G_z = \frac{z(s)}{\theta(s)} = -\frac{U}{s} = -\frac{1}{s} \quad (4.47)$$

2차 시스템으로서 정착시간(Settling Time) $t_s=5s$, 오버슈트는 1%까지 허용된다고 한다면 이를 만족하는 pole의 위치는 다음과 같다.

$$S_{1,2} = -0.4124 + 1.0024i, -0.4124 - 1.0024i$$

$$K_p = -0.2407, K_d = -0.0493$$

다음은 위에서 구한 K_p 와 K_d 값을 사용하여 10도 선회명령을 계단입력으로 주었을 때의 반응을 시뮬레이션 한 결과이다. 프로그램은 Matlab Simulink를 사용하였고 시뮬링크 코딩은 Fig. 31과 같다.

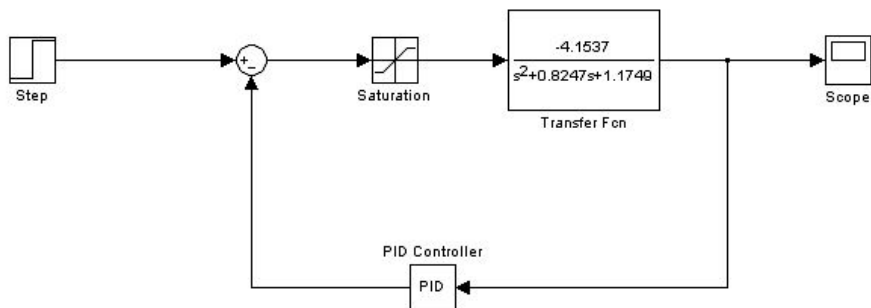


Fig. 31 Simulink Coding

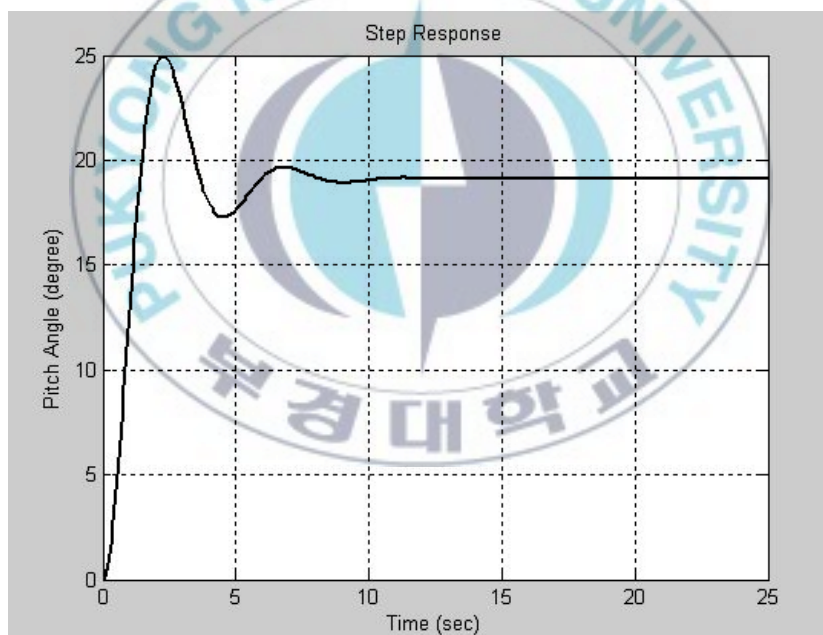


Fig. 32 Step Response ($K_p=-0.2407$, $K_d=-0.0493$)

Fig. 32를 보면 Pitch angle을 10도로 추종하도록 했을 때 추종각인 10도에 추종하지 못하고 오버슈트도 매우 크다. K_p 와 K_d 를 튜닝한 그래프는

Fig. 33과 같다.

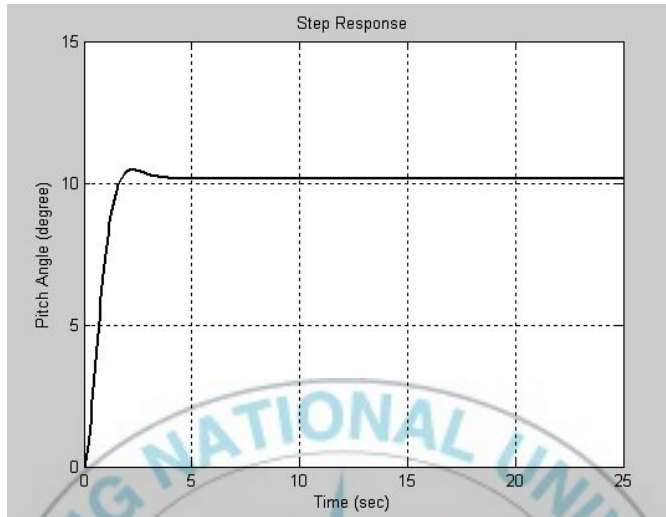


Fig. 33 Step Response($K_p=-0.7$, $K_d=-0.5$)

4.3.2 슬라이딩 모드 제어

3.3.1장에서 기술한 수직면 운동 모델 선형화를 거친 3자유도 운동방정식을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$(I_{yy} - M_q)\dot{q} = M_q q - z_G W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \quad (4.48)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (4.49)$$

$$\dot{z} = -U \theta \quad (4.50)$$

슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위해서 입력값과 출력값에 대한 전달함수를 구한다. 그리고 이 전달함수로부터 슬라이딩 모드 Gain 값을 도출한다. Vector Form 과 상태 공간형식(State-space form)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q & z_G W & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (4.51)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8247 & -1.1749 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.1537 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (4.52)$$

이 시스템은 제어가능하다. 위의 식으로부터 개루프 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G_{Plant} = \frac{z(s)}{\delta_s(s)} = \frac{-\frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q}}{s(s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q}s + \frac{z_G W}{I_{yy} - M_q})} = \frac{4.1537}{s(s^2 + 0.8247s + 1.1749)} \quad (4.53)$$

위의 값이 제어기는 스텐 방향타에 따른 중동요각과 스텐방향타에 따른 무인잠수정의 값으로 나눌 수 있다.

$$G_{\theta} = \frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{\frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q}}{s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q}s + \frac{z_G W}{I_{yy} - M_q}} = \frac{-4.1537}{s^2 + 0.8247s + 1.1749} \quad (4.54)$$

$$G_z = \frac{z(s)}{\theta(s)} = -\frac{U}{s} = -\frac{1}{s} \quad (4.55)$$

수직방향에 대한 제어법칙을 구해보면 다음과 같다.

$$u_v(t) = -k^T x(t) - [s^T b]^{-1} s^T \hat{f}(t) + [s^T b]^{-1} s^T \dot{x}(t)_{com} - [s^T b]^{-1} \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (4.56)$$

위 식을 구하기 위해 Pole placement method를 써서 궤환시스템의 게인 벡터인 k 를 구해보자. 상태방정식으로부터 PD제어기에서 구한 극점을 이용해 Matlab 함수인 place를 써서 K 를 구하면 $K_p = -0.2407$, $K_d = -0.0$

493, $K_{zp}=0.5$ 이다. Closed loop dynamics matrix에서 슬라이딩 모드제어기의 $A_c = A - B*$ 이고 A_c 로부터 슬라이딩 계수 s 가 정해진다. 상태방정식의 상태 매트릭스와 구한 K 게인값을 이용하여 슬라이딩 모드 계수를 구해보면 $s_1=0.6372$, $s_2=0.0645$, $s_3=-0.7680$ 이 나오므로 구한 계수들을 사용하여 수평방향에 대한 제어법칙을 구해보면 다음과 같다.

$$\delta_s = 0.2407q + 0.0493\theta + 0.378\eta \tanh\left(\frac{0.6372q + 0.0645\theta - 0.7680(z - z_{com})}{\phi}\right) \quad (4.57)$$

PD제어기와 동일한 극점은 $-0.4 + 0.8392i$, $-0.4 - 0.8392i$ 이며 스위칭게인 η 와 채터링제거를 위한 경계층 두께 ϕ 는 시행착오법으로 결정하였다.



4.4 Way-point 알고리즘

AUV의 운동 시뮬레이션은 AUV의 6자유도 운동방정식을 기반으로 하고 있으며 비선형 데이터를 미리 알고 있고 그 값과 AUV 운동 설정 초기 값 및 방향타의 각도를 6자유도 운동 방정식에 대입하여 AUV의 전체 운동을 계산하는 방식으로 프로그램이 되어있다. AUV의 Way-point 추적 시뮬레이션의 경우는 목표 지점의 좌표 값과 AUV의 운동 방향을 계산하여 오차를 보상하는 PD 제어기법을 적용하여 목표하는 지점을 통과할 수 있도록 프로그램이 되어있다. 이러한 평면, 수직 시뮬레이션의 Block Diagram 및 Way-point 추적 시뮬레이션의 Flow chart는 Fig. 34와 같다.

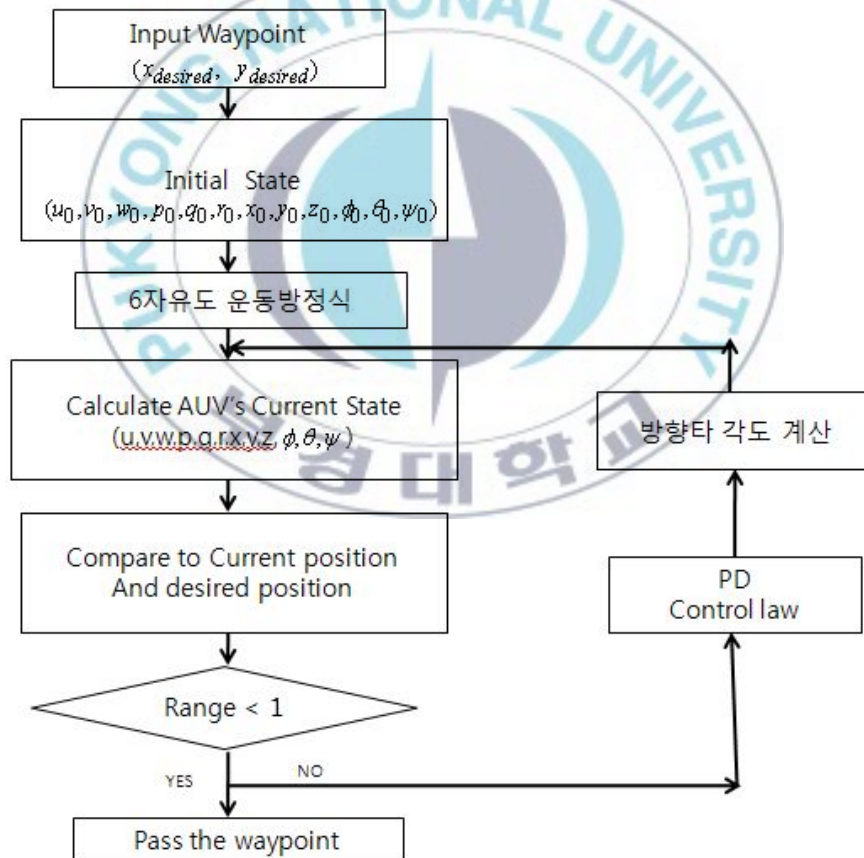


Fig. 34 Way - point Flow chart

제 5 장 AUV의 운동 시뮬레이션

5.1 수평면운동 시뮬레이션

AUV의 운동 방정식을 기반으로 AUV의 X-Y 평면 선회운동을 시뮬레이션 수행하였다. X-Y 평면운동 시뮬레이션을 수행함으로써 별도의 제어 없이 AUV의 초기 운동 상태를 정의하고 일정 시간을 두고 AUV의 운동을 확인하였다. 이러한 작업을 통해 설계된 AUV 모델링의 운동 성능을 확인할 수 있고 모델링의 타당성을 확인할 수 있기 때문에 가장 기본적인 과정이라고 할 수 있다.

AUV의 수직 방향타를 10도, 20도, 30도로 하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 35 ~ Fig. 37과 같다. 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 일정한 속도로 운동 중에는 방향타의 각도가 커질수록 회전반경도 작아지는 것을 확인할 수 있다.

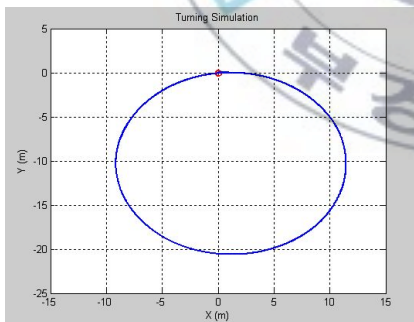


Fig. 35 Turning Simulation(10도)

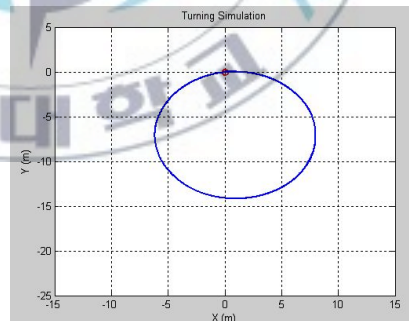


Fig. 36 Turning Simulation(20도)

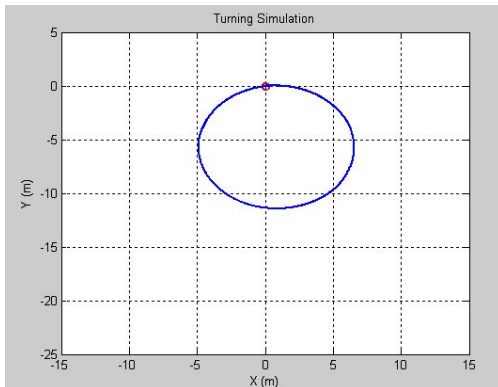


Fig. 37 Turning Simulation(30도)

5.2 수직면운동 시뮬레이션

5.2.1 깊이 제어 시뮬레이션

4장에서 구한 수직면운동에서의 K_p , K_d 값을 기반으로 수직면운동에서의 깊이 추종 운동을 시뮬레이션 해 보았다. 깊이 제어에 쓰이는 K_{zp} 가 증가할수록 빠른 응답이 보이지만 종동요가 45도 이상 커지는 것을 지양하기 위하여 시뮬레이션을 통해 무인잠수정의 운동성능에 맞는 K_{zp} 값을 도출한다.

시뮬레이션은 앞장과 동일하게 Matlab Simulink를 사용하였고 Fig. 38은 깊이제어가 포함된 Simulink Coding이다. K_{zp} 는 0.5부터 0.5씩 증가시키면서 시뮬레이션 하였다.

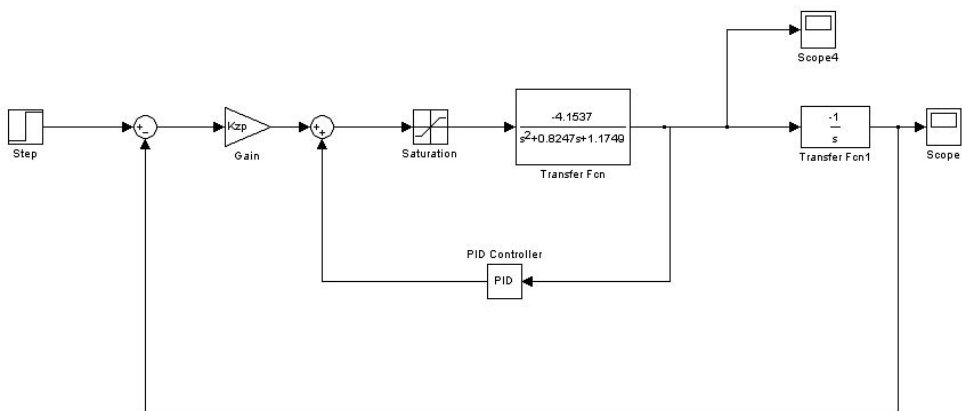


Fig. 38 Depth control block diagram using Simulink

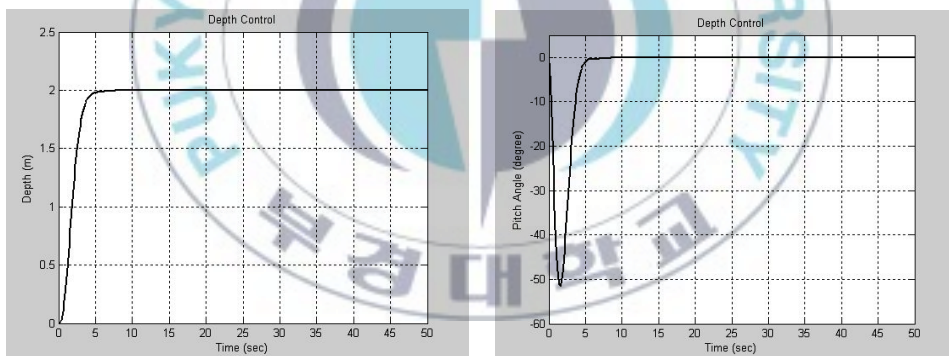


Fig. 39 Depth Control ($K_{zp}=0.5$, $K_p = -0.7$, $K_d=-0.5$)

Fig. 39를 보면 깊이는 잘 추종해 나가지만 종동요각이 45도 이상 커져서 불안정한 운동성능을 보인다. 그러므로 K_p 와 K_d 를 튜닝하여 적절한 K_{zp} 값을 도출한다.

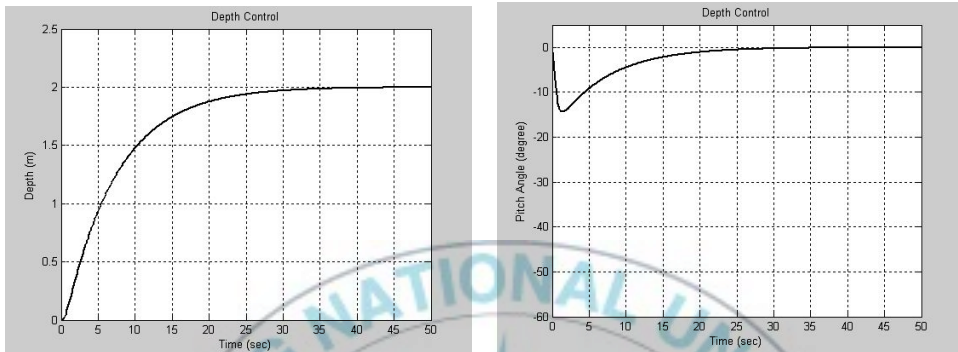


Fig. 40 Depth Control ($K_{zp}=0.5$, $K_p=-3.5$, $K_d=-1.8$)

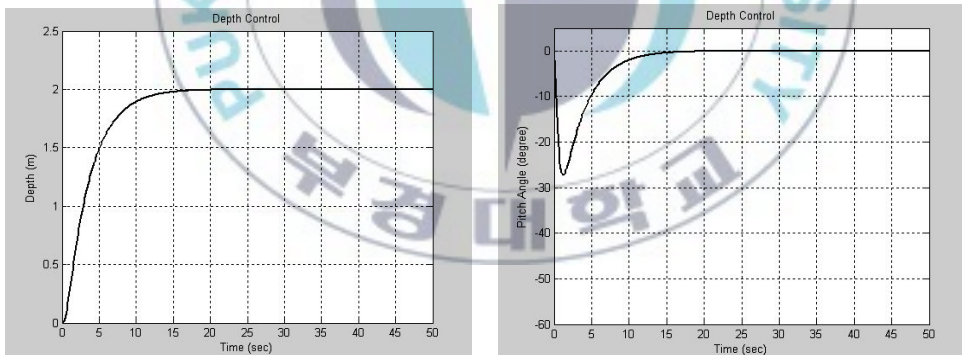


Fig. 41 Depth Control ($K_{zp}=1.0$, $K_p=-3.5$, $K_d=-1.8$)

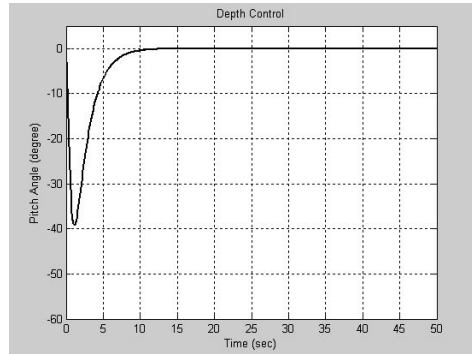
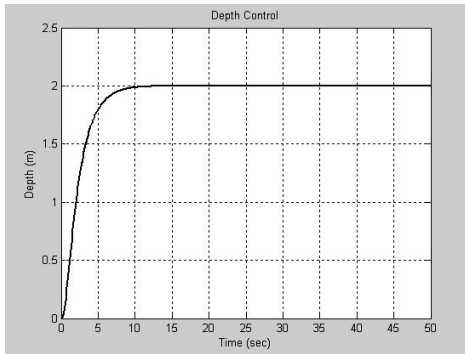


Fig. 42 Depth Control ($K_{zp}=1.5$, $K_p=-3.5$, $K_d=-1.8$)

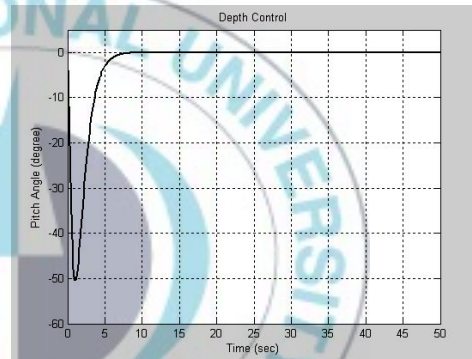
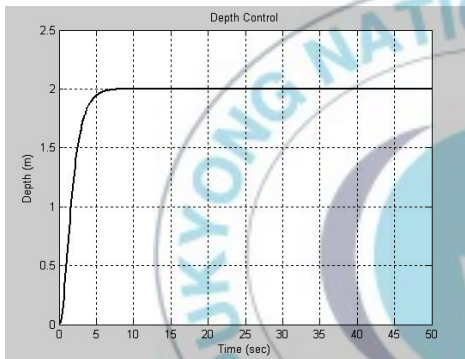


Fig. 43 Depth Control ($K_{zp}=2$, $K_p=-3.5$, $K_d=-1.8$)

Fig. 40 ~ Fig. 43을 보면 K_{zp} 가 0.5인 경우는 Settling Time이 너무 길고 $K_{zp}=2.0$ 인 경우 종동요각이 45도를 벗어나서 불안정한 운동성능을 보이게 된다. 그러므로 $K_p=-3.5$, $K_d=-1.8$ 인 경우 $K_{zp}=1.0$ 에서 1.5사이의 값을 쓰는 것이 좋다.

5.2.3 깊이 제어 시뮬레이션 비교.

5.2.2 장에서 구한 PD 제어기와 슬라이딩 모드 제어기 게인값을 이용하여 깊이제어 시뮬레이션 해보았다. PD제어기와 슬라이딩 모드 제어기 모두 -2 m 의 깊이를 유지하도록 시뮬레이션 하였으며 Fig.44 ~ Fig. 46은 PD제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 비교한 그래프이다.

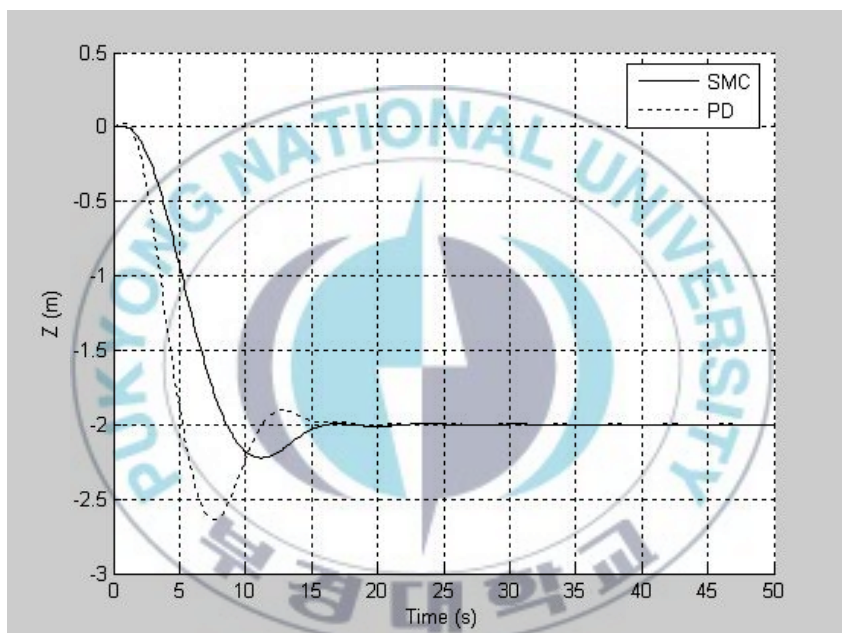


Fig. 44 시간에 따른 깊이

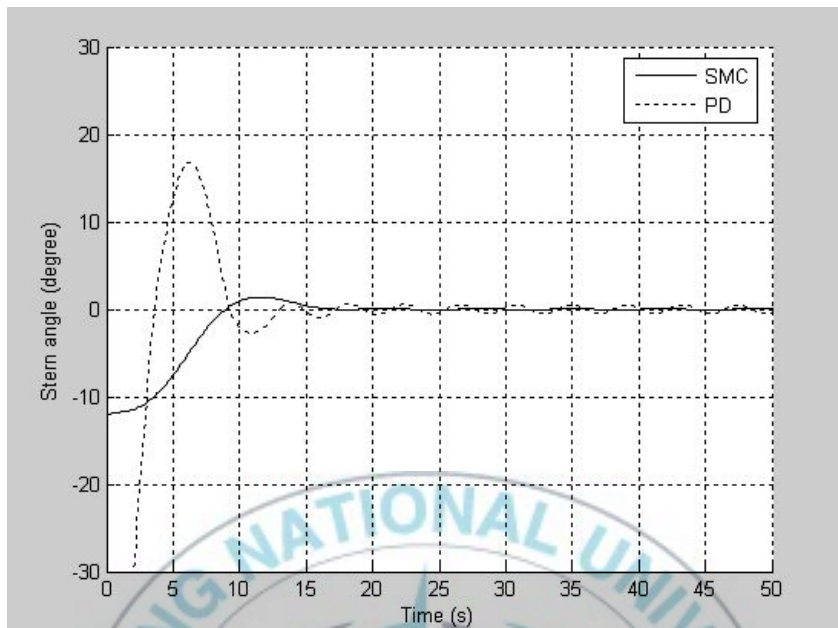


Fig. 45 시간에 따른 Stern angle

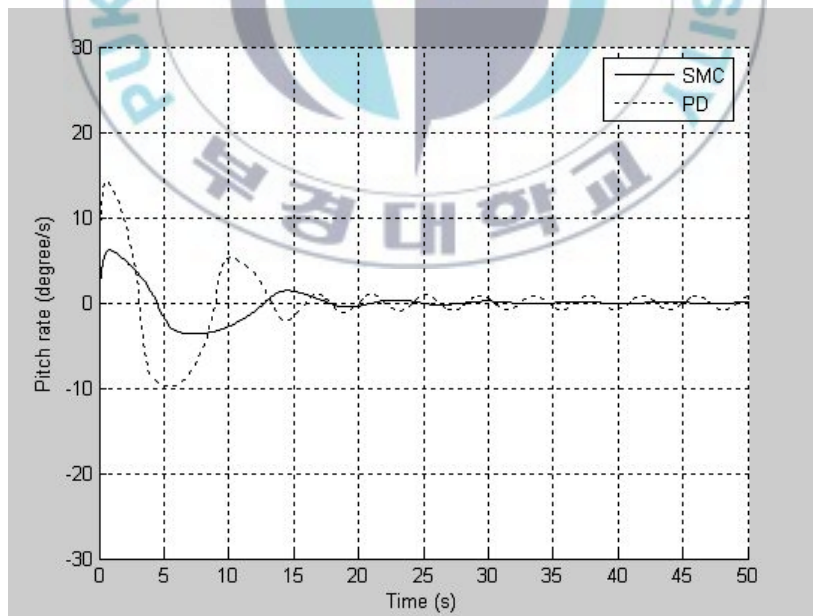


Fig. 46 시간에 따른 Pitch angle rate

PD 제어기의 경우 정착 시간이 슬라이딩 모드 제어기에 비해 0.2 초 정도 느린 것을 알 수 있고 오버슈트도 10% 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 그러므로 수직면 운동은 PD 제어기보다 슬라이딩 모드 제어기가 더 나은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.



5.2.3 Pitch Down 시뮬레이션

AUV의 운동 방정식을 기반으로 AUV의 X-Z 평면 Pitch Down 운동을 시뮬레이션 수행하였다. X-Z 평면운동 시뮬레이션을 수행함으로써 별도의 제어기 없이 AUV의 초기 운동 상태를 정의하고 일정 시간을 두고 AUV의 운동을 확인하였다. 이러한 작업을 통해 설계된 AUV 모델링의 운동 성능을 확인할 수 있고 모델링의 타당성을 확인할 수 있기 때문에 가장 기본적인 과정이라고 할 수 있다.

AUV의 스티어링 각도를 5도, 10도, 15도로 하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 47 ~ Fig 50과 같다. 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 일정한 속도로 운동 중에는 스티어링 각도가 커질수록 깊이도 커지는 것을 확인할 수 있다.

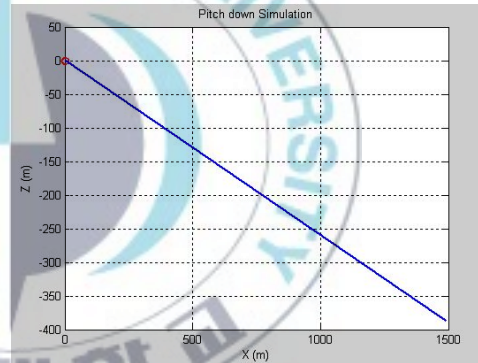
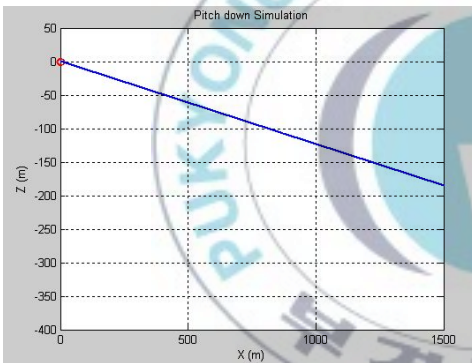


Fig. 47 Pitch Down Simulation(-5도) Fig. 48 Pitch Down Simulation (-10도)

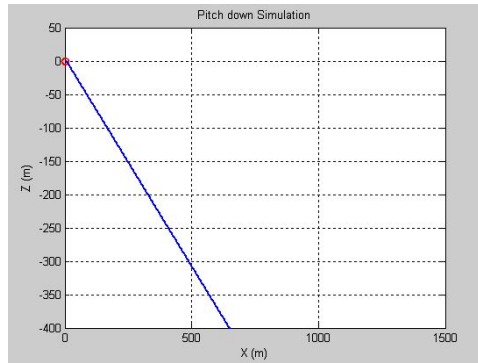
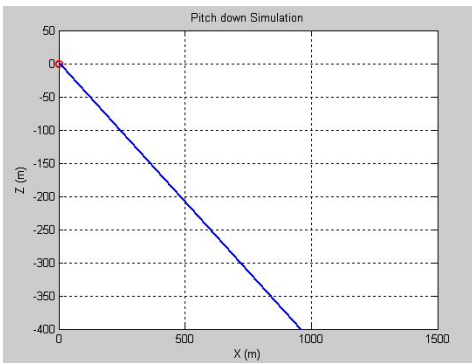


Fig. 49 Pitch Down Simulation(-15도) Fig. 50 Pitch Down Simulation(-20도)

5.3 Way-point 추적 시뮬레이션

앞서 구현한 AUV의 수평 시뮬레이션 및 수직 시뮬레이션은 설계된 AUV의 운동을 AUV의 초기상태를 가정하여 AUV의 운동을 확인하는데 목적이 있다. 따라서 별도의 제어기능이 필요하지 않기 때문에 Fig. 22에서 확인 가능한 바와 같이 시뮬레이션에 제어가 포함되어 있지 않다. 하지만 AUV는 User가 원하는 곳으로 운동이 가능해야 성공적으로 그 임무를 수행할 수 있다. 그에 따라 AUV에 통신 시스템을 장착하여 RF안테나와 GPS를 통해 현재 위치를 파악하고 방향타 각도 조절을 통해 목표위치까지 운동할 수 있어야 한다. 이와 같은 목표 위치로 AUV가 운동을 할 수 있도록 하기위해 간단한 Way-point 운동 시뮬레이션을 Fig.23과 같은 Flow chart를 통해 수행하였다. AUV의 초기 위치를 기준으로 AUV 방향타의 각도를 User가 원하는 Target Position을 통과하여 운동할 수 있도록 PD 제어를 통해 보상하는 시뮬레이션을 수행하였다.

현재까지 학문이 발달함에 따라 많은 제어이론이 존재하고 많은 제품에 다양한 제어가 활용되고 있다. 본 연구에서 사용한 PD 제어기의 경우 제어기 구성이 매우 간단하고 제어 이득 조절이 쉬우며 빠른 응답성과 안정성으로 로봇제어에 많이 활용되고 있다. 방향타의 각도를 AUV의 위치를 이용해 각도 값을 계산하여 범위를 설정하여 오차범위 밖이면 방향타 각도를 보상하여 오차범위 내에 들어오도록 제어기를 구성하였다. PD제어기의 비례계수(K_p) 및 미분계수(K_d)는 제어 모델이 주어지기 때문에 주파수 영역 설계법, 근궤적법, 과도응답법을 사용하거나 반복 작업으로 좋은 응답을 보이는 계수 값을 추적하는 방법도 있다.

5.3.1 PD제어

1)수평운동

본 연구에서는 (0,0), (20,40), (40,40), (40,20), (20,0)와 같이 수평면에 5개의 Way-point를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 51은 4.2장에서 설계한 PD제어기의 게인 값을 대입하여 Way-point 시뮬레이션을 한 결과이다.

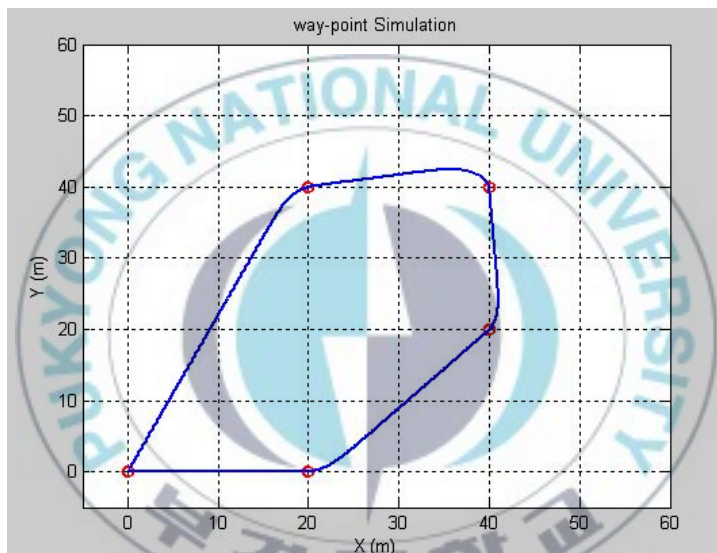


Fig. 51 Way-point Simulation ($K_p = -3$, $K_d = -1.8$)

추종성은 좋지만 AUV의 동역학적인 운동을 생각할 때 순간적으로 회전 각이 많이 돌아가지 않는 불가능한 모션이므로 최적화된 게인 값을 시행착오법으로 튜닝 해보았다.

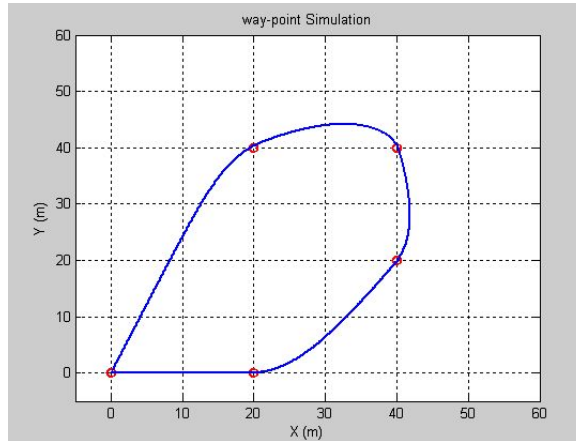


Fig. 52 Way-point Simulation ($K_p = -2$, $K_d = -5$)

2) 수직운동

본 연구에서는 $(0, 0, 0)$, $(30, 0, -5)$, $(60, 0, -2)$, $(90, 0, -5)$, $(150, 0, -5)$ 와 같이 수평면에 5개의 Way-point를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 53은 4.3장에서 설계한 PD제어기의 게인 값을 대입하여 Way-point 시뮬레이션을 한 결과이다.

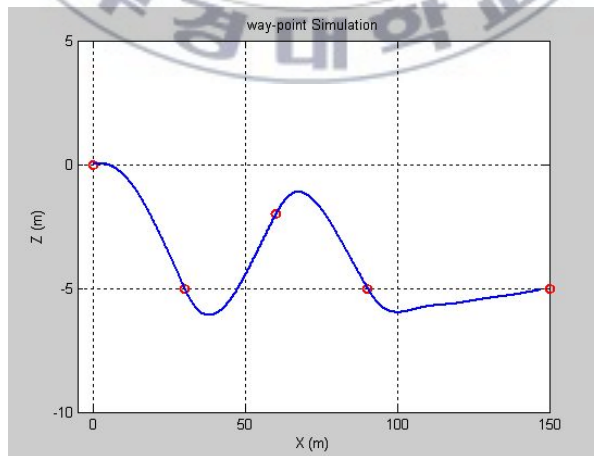


Fig. 53 Way-point Simulation ($K_p = -0.2407$, $K_d = -0.0493$)

5.3.2 슬라이딩 모드 제어

1) 수평 운동

본 연구에서는 (0,0), (20,40), (40,40), (40,20), (20,0)와 같이 수평면에 5개의 Way-point를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 54는 4.2장에서 설계한 슬라이딩 모드 제어기의 게인 값을 대입하여 Way-point 시뮬레이션을 한 결과이다.

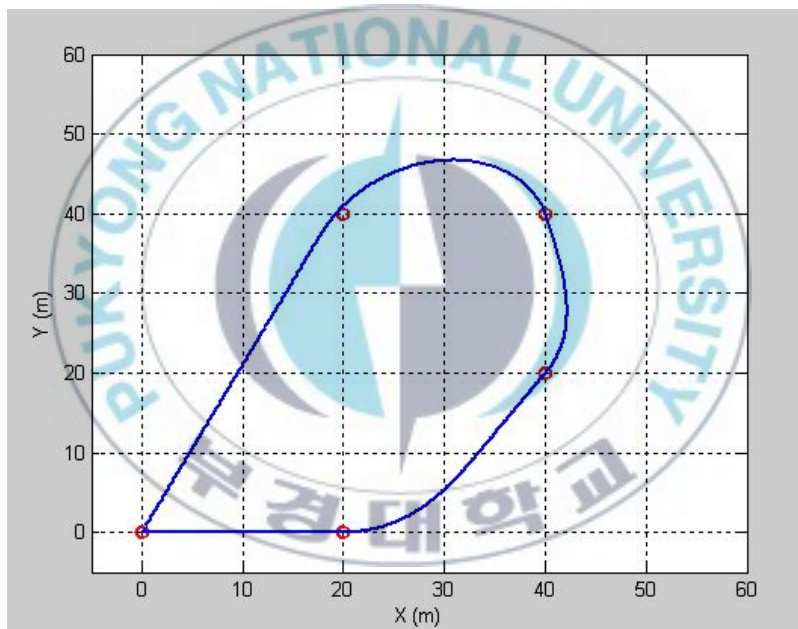
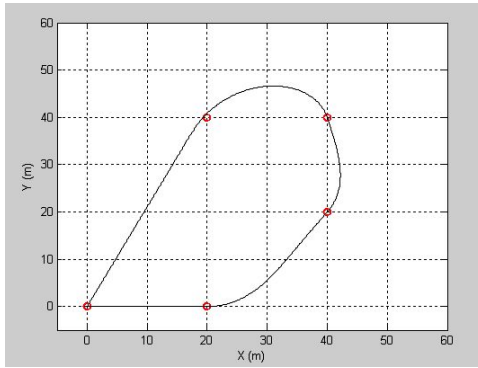
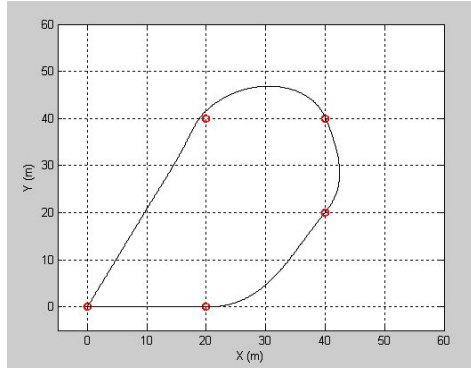


Fig. 54 Way-point Simulation ($\eta = 5.0$, $\theta = 0.5$)

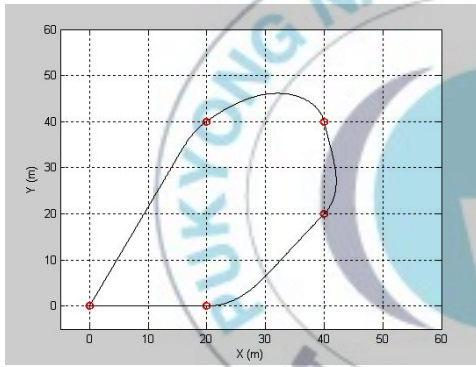


(A=A, B=B)

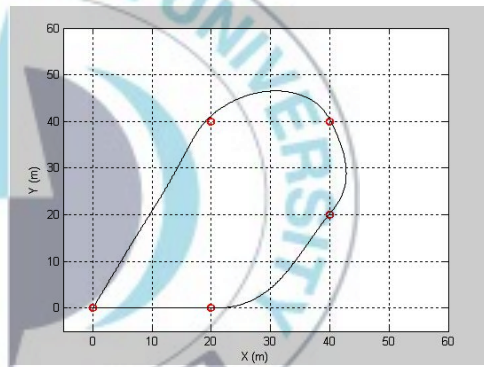


(A=1/2A, B=1/2B)

Fig. 55 Way - point Simulation ($\eta = 5.0$, $\theta = 0.5$)



(A=A, B=B)



(A=1/4A, B=1/4B)

Fig. 56 Way - point Simulation ($\eta = 7.0$, $\theta = 0.5$)

외란이 주어졌을 때 시스템의 계수들의 값이 바뀌는 것이라고 가정하면 시스템의 상태방정식의 값을 바꾸는 것이 시스템에 외란이 주어졌다는 것과 같으므로 무인잠수정의 상태방정식의 값을 1/2, 1/4로 바꾸어 시뮬레이션 해 보았다. Fig. 55와 Fig. 56을 보면 전체적으로 외란이 주어지면 추종성은 약간은 떨어지지만 외란에 강한 강인성 제어인 슬라이딩 모드 제어기는 잘 추종해나가는 것을 볼 수 있다.

2) 수직 운동

본 연구에서는 $(0, 0, 0)$, $(30, 0, -5)$, $(60, 0, -2)$, $(90, 0, -5)$, $(150, 0, -5)$ 와 같이 수평면에 5개의 Way-point를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 57은 4.2장에서 설계한 슬라이딩 모드 제어기의 계인 값을 대입하여 Way-point 시뮬레이션을 한 결과이다.

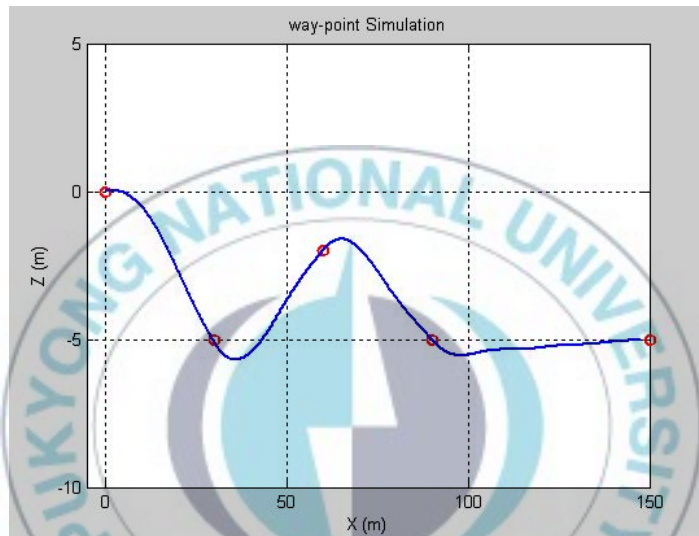


Fig. 57 Way - point Simulation ($\eta = 5.0$, $\theta = 0.5$)

5.3.3 PD 제어기와 슬라이딩 모드 제어기의 비교

본 연구에서는 $(0,0)$, $(30,10)$, $(40, 0)$, $(30, -10)$, $(0,0)$ 와 같이 수평면에 5개의 Way-point를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 은 4.2장에서 설계한 Pd제어기의 게인 값을 대입하여 Way-point 시뮬레이션을 한 결과이고 Fig. 58은 4.2장에서 설계한 슬라이딩 모드 제어기의 게인 값을 대입하여 Way - point 시뮬레이션을 한 결과이다.

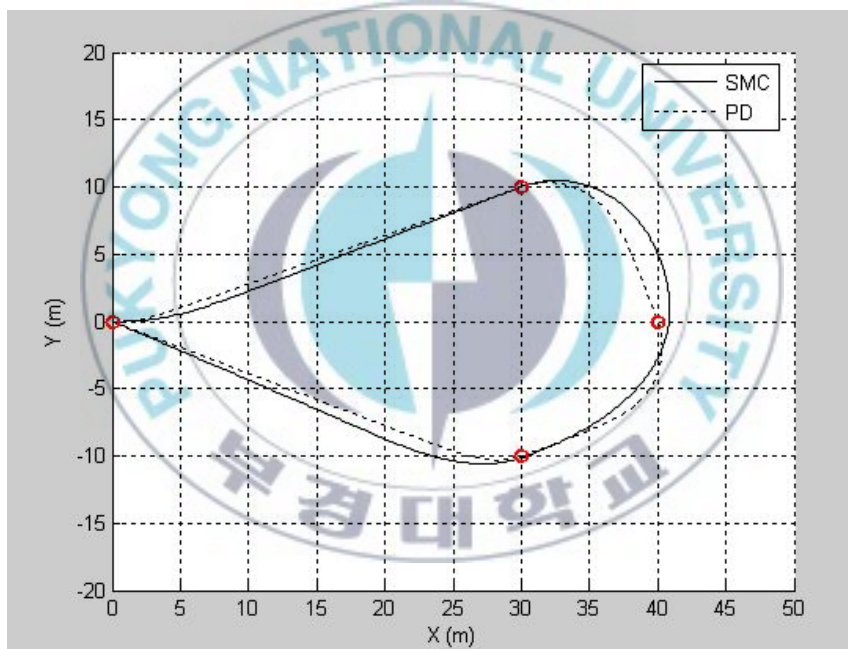


Fig. 58 Way - point Simulation 비교

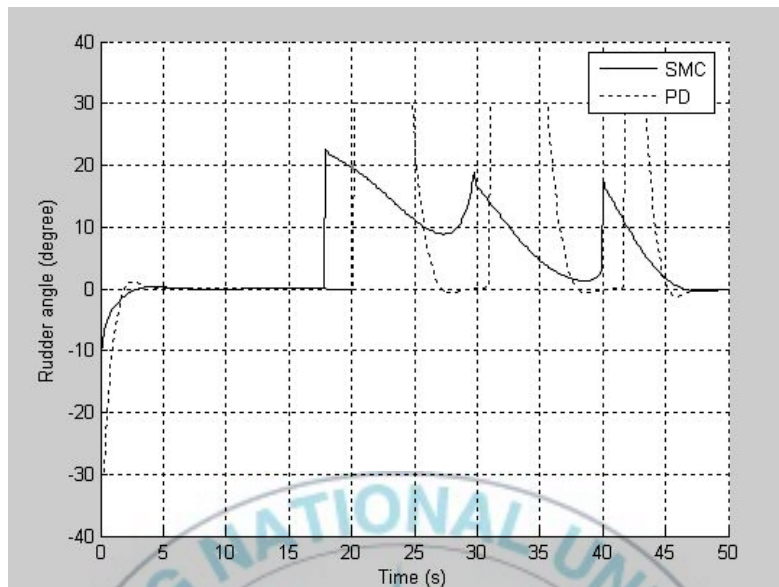


Fig. 59 Way - point Simulation (Rudder angle)

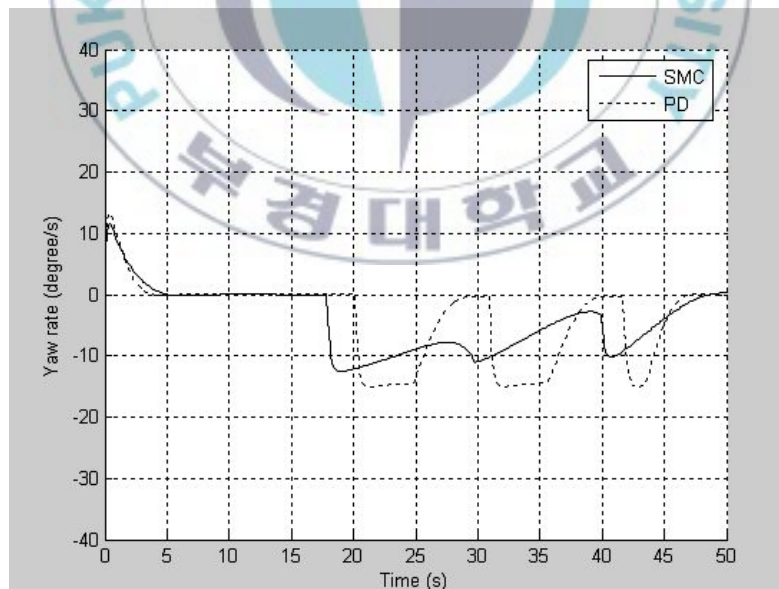


Fig. 60 Way - point Simulation (Yaw angle rate)

PD제어기와 슬라이딩 모드 제어기 모두 설정한 Way - point에 잘 추종해 나감을 알 수 있다. 미리 설정한 Way - point 오차는 1m로 설정하였고 3번째 Way - point에서 슬라이딩 모드 제어기가 0.5m의 오차를 보이고 있지만 Fig. 59 의 Rudder angle 그래프를 보면 알 수 있듯이 슬라이딩 모드 제어기가 PD 제어기보다 응답이 2초 정도 빠른 것을 알 수 있다.



제 6장 AUV 운동성능 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.1 수평면 시험

6.1.1 직진도 시험

수평면상에서 직진성을 시험하였다. 시험은 실내수영장에서 실시하였으며 $K_p=5$, $K_d=3$ 이고 속도는 약 1m/s 이다. Fig. 61은 시뮬레이션과 수조에서의 시험결과를 비교한 그래프이며 직진성이 좋은 것을 알 수 있다.

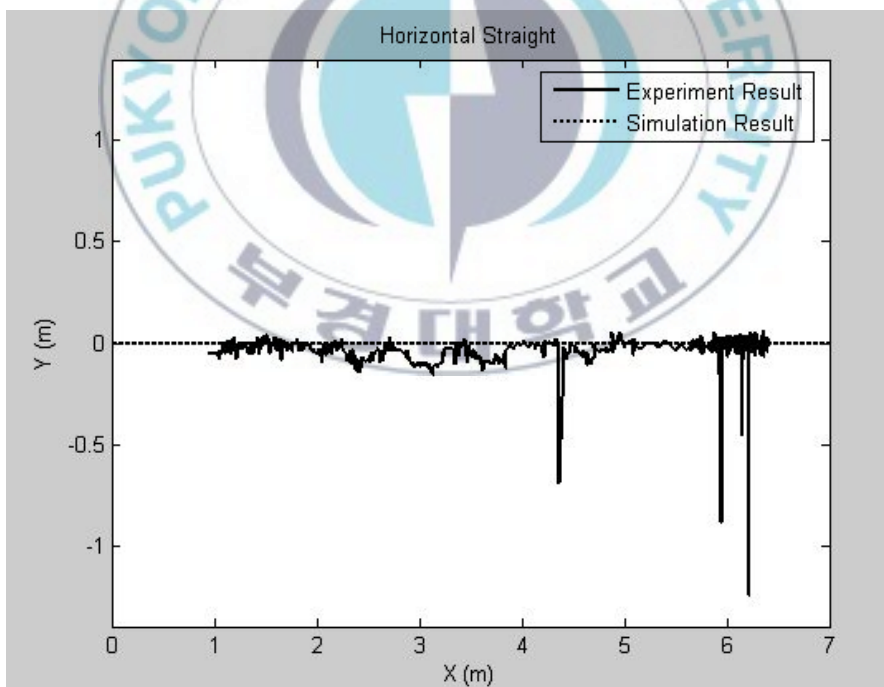


Fig. 61 수평면상의 직진성 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.1.2 선회운동 시험

수평면상에서 입력은 러더방향타의 각도로만 주고 추진하였을 때의 선회운동 시뮬레이션이다. 입력은 30도이며 시험은 실험역에서 실시하였다. Fig. 62를 보면 시뮬레이션 결과에 비해 실제 시험결과는 반경이 1.2배 ~ 1.5배 정도 큰 것을 알 수 있으며 이런 결과는 현재 무인잠수정이 양성 부력을 가지고 있기 때문에 상부에 있는 러더 방향타가 완전히 잠기지 않아 완전한 선회운동성능이 나오지 않아 그런 것으로 추정되며 실험역에서 시험시 조류가 외란으로 발생해 약간은 밀리는 현상도 원인으로 생각된다.

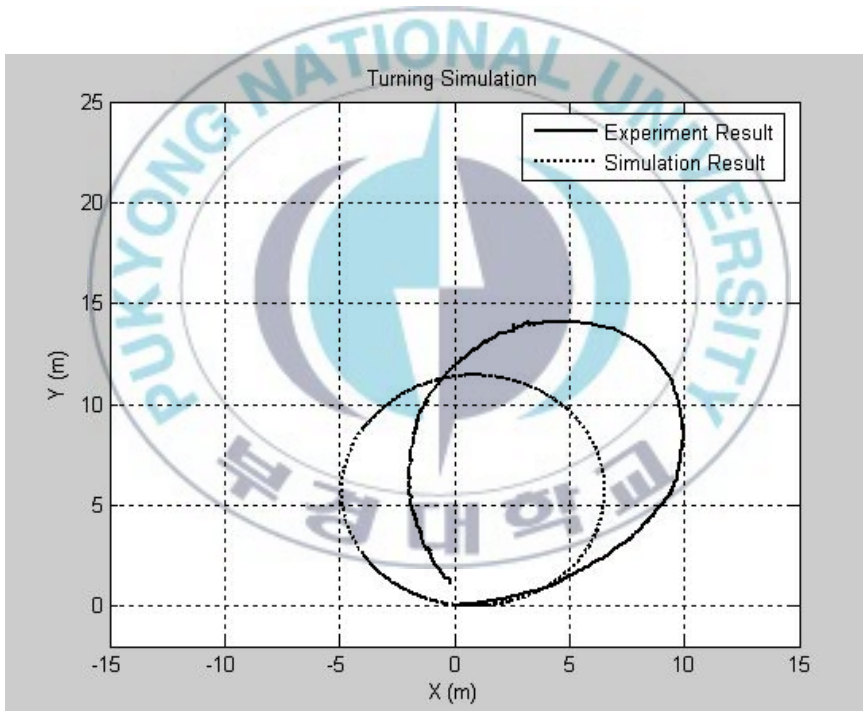


Fig. 62 선회운동 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.2 Way-point 시험

수평면상에서 경로추적시험을 실시하였다. Way-point 좌표는 (0, 0, 0), (30, 10, 0), (40, 0, 0), (30,-10, 0), (0, 0, 0)이며 실험역에서 실시하였다. Fig. 63을 보면 시험 결과 조류의 영향이 있음에도 불구하고 경로는 잘 추종해가는 것을 볼 수 있다.

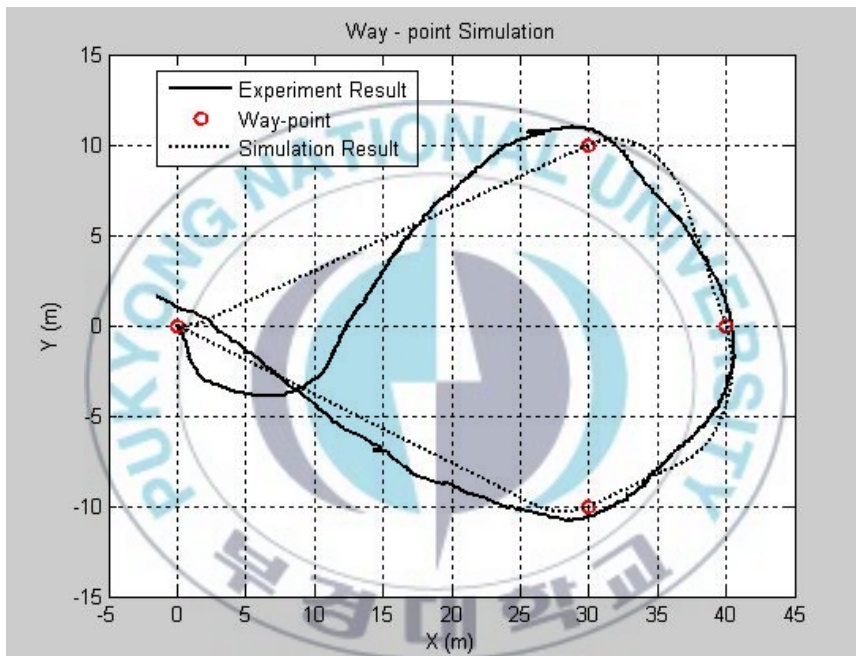


Fig. 63 Way-point 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.3 수직면 시험(깊이제어 운동)

수직면 시험은 깊이제어 운동을 시험하였다. 실험역에서 실내수영장에서 실시하였으며 Fig. 64는 수심 0.5 m로 잠수항해를 계속하도록 하는 시물레이션과 수조에서의 시험결과를 비교한 그래프이며 일정 수심을 잘 유지하며 진행해 나가는 것을 알 수 있다.

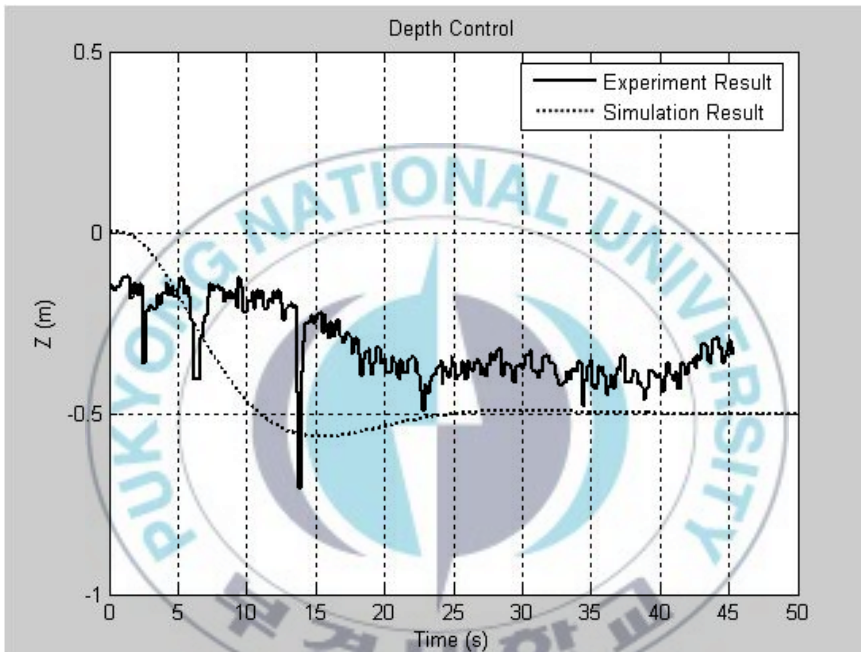


Fig. 64 깊이제어 시험과 시물레이션 결과 비교

제 7장 결론

본 논문에서는 무인잠수정의 시스템을 구성해보고 무인잠수정의 비선형 운동해석을 위하여 수학적 모델링을 선형화하여 실제 시험을 통해 시험결과와 컴퓨터 시뮬레이션 값을 비교해보았다. 무인잠수정의 불안정한 동역학적 성능과 외란에 의한 요소를 알아보기 위해 일반적으로 많이 쓰이는 PD제어와 강인성을 가진 슬라이딩 모드 제어를 설계하여 시뮬레이션을 통해 비교해 보았다. 6자유도 비선형 운동방정식을 선형화시키고 제어기 설계를 보다 용이하게 하기 위하여 수평면과 수직면으로 나누어 제어를 설계하였으며 수평면과 수직면으로 분리시킴으로써 영향이 적은 비선형 계수는 제외하고 제어를 설계하였다. 그에 따른 모델링 오차를 잘 극복하는 슬라이딩 모드 제어를 설계하여 적용하였으며 일반적으로 많이 쓰이는 PD제어기와 비교해보았다. 시뮬레이션 결과 PD제어기와 슬라이딩 모드 제어기 모두 설정한 Way - point에 잘 추종해 나감을 알 수 있다. 미리 설정한 Way - point 오차는 1m로 설정하였으며 PD 제어기와 슬라이딩 모드 제어기 모두 1m 오차내에서 운동을 하는 것을 알 수 있고 슬라이딩 모드 제어기가 PD 제어기보다 응답이 더 빠른 것을 알 수 있다. 또 슬라이딩 모드 제어기는 다음 Way - point로 추종해 나갈 때 최대 Rudder angle이 약 20도로써 외력에 강한 제어기로서의 모습을 보여준 반면에 PD제어기의 경우 Rudder angle이 30도를 넘어가는 경우를 보였다. 수직모델의 경우 PD 제어기의 경우 정착 시간이 슬라이딩 모드 제어기에 비해 약간 느린 것을 알 수 있고 오버슈트도 10% 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 그러므로 수직면 운동은 PD 제어기보다 슬라이딩 모드 제어기가 더 나은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 또 외란이 주어졌을 때 PD제어기의 경우 선형화된 모델과 계수에 크게 의존하는 반면 또한 슬라이딩 모드 제어기는 다소의 외란이 주어졌을 때도 보다 좋은 추종성을 보여주었다. 그러므로 슬라이딩 모드 제어기의 경우 다소의 외란에도 강인한 제어가 가능하므로 심해의 열악한 조건에서도 요구되는 제어성능을 보이기 위해 슬라이딩 모드 제어기가 적합하다는 것을 알 수 있었다. Remus 논문에 나온 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 보임을 알 수 있었고 본

논문에서는 수직면 운동인 깊이제어 시뮬레이션 및 실험결과에서 더욱 뚜렷한 결과를 얻을 수 있었다.

실제 무인잠수정이 운용되는 실험역에서는 여러 가지 외란이 생기며 무인잠수정의 운용시 생기는 Roll 운동이 선체의 자세를 많이 불안하게 한다. 따라서 무인잠수정의 비선형 모델에 가까운 모델을 구축하여 결과를 고찰하며 외란이 주어졌을 때에 적합한 제어 시스템을 설계하여야 한다.



참 고 문 헌

- 1) "Guidance and Control of Ocean Vehicle", "Thor I.Fossen", 1999
- 2) "Modeling, Identification, and Analysis of Limit-cycling Pitch and Heave Dynamics in an ROV", "Sergio M. Savaresi, Fabio Previdi, Alessandro Dester", 2004 IEEE
- 3) "Preliminary Experiments in the Model Based Dynamic Control of marine Thruster", "Louis L. Whitcomb, Dana R. Yoerger", 1996 IEEE
- 4) "AUV/ROV propulsion thruster", "Bert Dewijs", 2000 IEEE
- 5) "Navigation and control for a Test Bed AUV-SNUUV I", "Kihun Kim, Hang S. Choi", 2004 IEEE
- 6) "Estimation of AUV dynamics for sensor fusion", "Kjell Magne Fauske, Fredrik Gustafsson, Øyvind Hegrenæs",
- 7) "Sliding mode control of remotely operated vehicles for horizontal plane motions" "N.Olgac, B.E.Platin. J.M.Chang", IEE Vol138.No.5 1991
- 8) "Modified S-Plane Control of AUV Based on Motion Compensation", "Zhang Lei; Pang Yong-Jie; Wan Lei; Qin Zai-Bai", ISA 2009. International Workshop on , vol., no., pp.1-5, 23-24 May 2009
- 9) "Coupled, non-linear control system design for autonomous underwater vehicle (AUV)", "Santhakumar, M.; Asokan, T", ICARCV 2008. 10th International Conference on , vol., no., pp.2309-2313, 17-20 Dec. 2008

- 10) "The synthesis of multi-channel adaptive variable structure system for the control of AUV," , "Lebedev, A.V.; Filaretov, V.F", IROS 2008. I IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.2834-2839, 22-26 Sept. 2008
- 11) "A semi-physical virtual simulation system for AUV," , "Wang Hong-jian; Shi Xiao-cheng; Zhao Jie; Li Juan" , 04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04 , vol.3, no., pp.1560-1563 Vol.3, 9-12 Nov. 2004
- 12) "ROV (원격조종 수중로봇)의 소개와 ROV해미래의 운동 제어 및 신호 처리", "최현택, 김기훈, 이판목, 이종무, 전봉환", 한국정밀공학회지 제 26권 5호(2009년 5월)
- 13) "근해 조사용 무인잠수정의 개발 ", "김경기, 최형식, 강형석, 정구락, 권경엽", 대한기계학회 논문집 A권, 제 32권 제11호
- 14) "ROV (원격조종 수중로봇)의 소개와 ROV해미래의 운동 제어 및 신호 처리", "최현택, 김기훈, 이판목, 이종무, 전봉환", 한국정밀공학회지 제 26권 5호.
- 15) "확장칼만필터를 이용한 무인잠수정의 3차원 위치평가", "임종환, 강철웅", 한국정밀기계공학회지 제 21권 20 7호 (2004년 7월)

부록

A. 유차항 계수

a)Hull parameter

rho	=	1.03E+03;	% Seawater Density	[kg/m ³]
A_f	=	2.85E-02;	% Hull Frontal Area	[m ²]
A_p	=	2.26E-01;	% Hull Projected Area (XZ-plane)	[m ²]
S_w	=	7.09E-01;	% Hull Wetted Surface Area	[m ²]
Vol	=	3.15E-02;	% Estimated Hull Volume	[m ³]
W	=	2.99E+02;	% Measured Vehicle Weight	[N]
B	=	2.99E+02;	% Measured Vehicle Weight (horizontal)	[N]
B_est	=	3.17E+02;	% Estimated Hull Buoyancy	[N]
x_cb	=	5.54E-03;	% Estimated Long. Center of Buoyancy	[m]
C_d	=	3.00E-01;	% REMUS Axial Drag Coeff.	[n/a]
C_dc	=	1.10E+00;	% Cylinder Cross-flow Drag Coeff.	[n/a]
c_yd	=	1.20E+00;	% Hoerner Body Lift Coeff.	[n/a]
x_cp	=	-3.21E-01;	% Center of Pressure	[n/a]
alpha	=	3.59E-02;	% Ellipsoid Added Mass Coeff.	[n/a]

b)Center of Buoyancy w.r.t. Origin(CB)

xB	=	0.00E+00;	% Center of Buoyancy: X-dir	[m]
yB	=	0.00E+00;	% Center of Buoyancy: Y-dir	[m]
zB	=	0.00E+00;	% Center of Buoyancy: Z-dir	[m]

c) Center of Gravity w.r.t. Origin at CB

xG	=	0.00E+00;	% Center of Gravity: X-dir	[m]
yG	=	0.00E+00;	% Center of Gravity: Y-dir	[m]
zG	=	1.96E-02;	% Center of Gravity: Z-dir	[m]

d) Moments of Inertia w.r.t. Origin at CB

Ixx	= 1.77E-01;	% Moment of Inertia	[kg·m ²]
Iyy	= 3.45E+00;	% Moment of Inertia	[kg·m ²]
Izz	= 3.45E+00;	% Moment of Inertia	[kg·m ²]

B. 무차항 계수

a) Non-linear Force Coefficients

Xuu	= -3.90E+00;	% Cross-flow Drag	[kg/m]
Xudot	= -9.30E-01;	% Added Mass	[kg]
Xwq	= -3.55E+01;	% Added Mass Cross-term	[kg/rad]
Xqq	= -1.93E+00;	% Added Mass Cross-term	[kg·m/rad]
Xvr	= 3.55E+01;	% Added Mass Cross-term	[kg/rad]
Xrr	= -1.93E+00;	% Added Mass Cross-term	[kg·m/rad]
Xprop	= 9.25E+00;	% Propeller Thrust	[N]
Yvv	= -1.31E+03;	% Cross-flow Drag	[kg/m]
Yrr	= 6.32E-01;	% Cross-flow Drag	[kg·m/rad ²]
Yuv	= -2.86E+01;	% Body Lift Force and Fin Lift	[kg/m]
Yvdot	= -3.55E+01;	% Added Mass	[kg]
Yrdot	= 1.93E+00;	% Added Mass	[kg·m/rad]
Yur [kg/rad]	= 5.22E+00;	% Added Mass Cross Term and Fin Lift	
Ywp	= 3.55E+01;	% Added Mass Cross-term	[kg/rad]
Ypq	= 1.93E+00;	% Added Mass Cross-term	[kg·m/rad]
YuudeltaR	= 9.64E+00;	% Fin Lift Force	[kg/(m·rad)]
Zww	= -1.31E+02;	% Cross-flow Drag	[kg/m]
Zqq	= -6.32E-01;	% Cross-flow Drag	[kg·m/rad ²]
Zuw	= -2.86E+01;	% Body Lift Force and Fin Lift	[kg/m]
Zwdot	= -3.55E+01;	% Added Mass	[kg]

Zqdot	= -1.93E+00;	% Added Mass	[kg·m/rad]
Zuq [kg/rad]	= -5.22E+00;	% Added Mass Cross-term and Fin Lift	
Zvp	= -3.55E+01;	% Added Mass Cross-term	[kg/rad]
Zrp	= 1.93E+00;	% Added Mass Cross-term	[kg/rad]
ZuudeltaS	= -9.64E+00;	% Fin Lift Force	[kg/(m·rad)]

b) Non-linear Moment Coefficients

Kpp	= -1.30E-01;	% Rolling Resistance	[kg·m ² /rad ²]
Kpdot	= -7.04E-02;	% Added Mass	[kg·m ² /rad]
Kprop	= -5.43E-01;	% Propeller Torque	[N·m]
Mww	= 3.18E+00;	% Cross-flow Drag	[kg]
Mqq	= -1.88E+02;	% Cross-flow Drag	[kg·m ² /rad ²]
Muw	= 2.40E+01;	% Body and Fin Lift and Munk Moment	[kg]
Mwdot	= -1.93E+00;	% Added Mass	[kg·m]
Mqdot	= -4.88E+00;	% Added Mass	[kg·m ² /rad]
Muq [kg·m/rad]	= -2.00E+00;	% Added Mass Cross Term and Fin Lift	
Mvp	= -1.93E+00;	% Added Mass Cross Term	[kg·m/rad]
Mrp	= 4.86E+00;	% Added Mass Cross Term	[kg·m ² /rad ²]
MuudeltaS	= -6.15E+00;	% Fin Lift Moment	[kg/rad]
Nvv	= -3.18E+00;	% Cross-flow Drag	[kg]
Nrr	= -9.40E+01;	% Cross-flow Drag	[kg·m ² /rad ²]
Nuv	= -2.40E+01;	% Body and Fin Lift and Munk Moment	[kg]
Nvdot	= 1.93E+00;	% Added Mass	[kg·m]
Nrdot	= -4.88E+00;	% Added Mass	[kg·m ² /rad]
Nur [kg·m/rad]	= -2.00E+00;	% Added Mass Cross Term and Fin Lift	
Nwp	= -1.93E+00;	% Added Mass Cross Term	[kg·m/rad]
Npq	= -4.86E+00;	% Added Mass Cross Term	[kg·m ² /rad ²]
NuudeltaR	= -6.15E+00;	% Fin Lift Moment	[kg/rad]

후기

대학원 생활을 하면서 항상 아낌없는 충고와 지도로 저를 이끌어 주신 백운경 교수님께 깊이 감사드립니다. 본 논문이 완성될 때까지 격려와 관심을 보여주셔서 잊을 수 없는 추억들이 될 것 같습니다. 또 부족한 저를 위해 가르침을 마다하지 않으셨던 강인필 교수님과 주문갑 교수님께 감사드립니다.

그리고 논문을 완성하고 차후 진로 및 인생 상담에 대해 많은 조언을 해주셨던 윤영기 선배님, 현지민 선배님, 박성준 선배님, 박석천 선배님 감사드립니다. 선배님들의 조언 덕분에 시행오차를 겪지 않고 논문을 완성할 수 있었던 것 같습니다. 또 실험실 생활을 하면서 힘든 일이 있으면 항상 같이 고민하고 좋은 일이 있으면 항상 같이 기뻐해주었던 후배 창민이와 상태에게도 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 다른 실험실에 있으면서도 저에게 힘을 주었던 정민이, 종민이, 주영이와 실험실 업무 및 학교생활에 도움을 주었던 9공학관 조교선생님들, 또 제가 알고 지냈던 9공학관 선, 후배님들에게 감사의 뜻을 전합니다.

대학교 1학년때부터 지금까지 돈돈한 우정을 자랑하는 경민이, 용준이, 지훈이, 동규, 학교 생활 힘들 때 너희가 많이 도움이 되어서 고맙고, 고등학교 단짝이었던 무술이, 민근이, 재영이 다들 바쁠텐데 조언 많이 해줘서 고맙다. 또 우리 군대 동기인 영용이, 정훈이, 세영이 항상 고맙다.

마지막으로 제가 하는 일이라면 항상 믿어주시는 아버지, 어머니 너무 감사하고 또 감사드립니다. 앞으로도 열심히 하는 아들이 되겠습니다. 해준 것도 없는데 저에게 항상 힘이 되어 주는 누나, 매형에게도 고마운 마음을 전합니다.

저를 지켜주시는 모든 분들께 마지막으로 감사의 뜻을 전하며 앞으로도 말은 바 포기하지 않고 열심히 하는 사람이 되겠습니다.

2011년 6월 논문작성을 마치고... 김명욱