



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

자율무인 잠수정 운동제어
시뮬레이터 개발 연구



2012년 2월 25일

부 경 대 학 교 대 학 원

메 카 트 로 닉 스 공 학 과

김 중 민

공 학 석 사 학 위 논 문

자율무인 잠수정 운동제어
시뮬레이터 개발 연구

지도교수 강 인 필

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함.

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

메 카 트 로 닉 스 공 학 과

김 중 민

김종민의 공학석사 학위논문을
인준함



주 심 공학박사 백운경 (인)

위 원 공학박사 정영석 (인)

위 원 공학박사 강인필 (인)

목 차

Abstract	v
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	4
2. AUV 동역학 모델	5
2.1 AUV의 좌표계	5
2.2 AUV의 6자유도 동역학 모델	9
3. AUV 유체 항력	10
3.1 Hydrostatic Force	10
3.2 부가질량(Added Mass)	13
3.3 Hydrodynamic Damping	15
3.4 제어판에 의한 힘과 모멘트	16
3.5 추진력에 의한 힘과 모멘트	19
3.6 외력과 모멘트	20
3.7 운동 방정식	21
4. AUV 제어기 설계	22
4.1 운동 방정식의 선형화	23
4.2 제어기 설계	27
5. AUV 운동제어 시뮬레이션	39
5.1 AUV의 underactuated 특성	39
5.2 시뮬레이션 제약조건 분석	41
5.3 AUV시뮬레이션 결과	45
6. AUV Simulator	48
6.1 Simulator의 필요성	48
6.2 Simulator 구성	49
6.3 Simulator 알고리즘	56
6.4 Simulator 결과	57

7. AUV 운동성능 시험과 시뮬레이션 결과 비교 -----	64
7.1 직진도 시험 -----	64
7.2 선회운동 시험 -----	65
7.3 Way-point 시험 -----	66
7.4 수직면 시험(깊이제어 운동) -----	67
8. 결론 -----	68
참 고 문 헌 -----	69



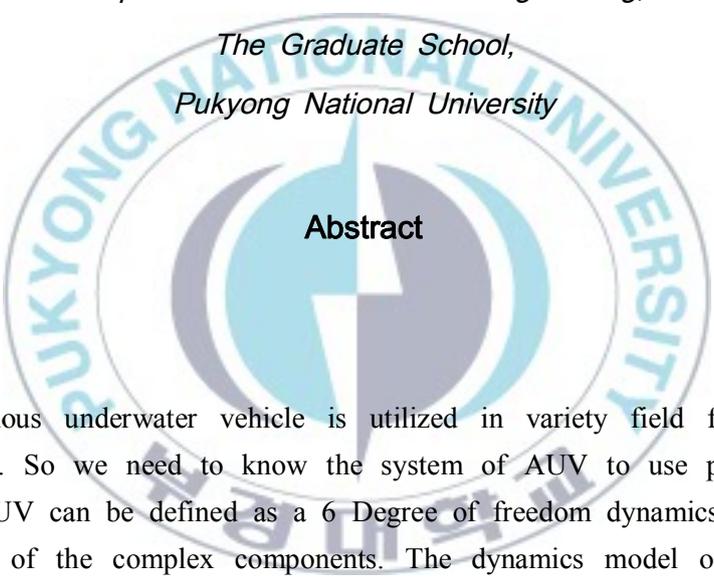
List of Tables and Figures

Table. 2.1 AUV 6자유도 운동변수	7
Fig. 2.1 AUV의 좌표계.	6
Fig. 3.1 무게중심과 부력중심의 차에 의해 발생하는 모멘트.	11
Fig. 3.2 방향타 유입각.	17
Fig. 4.1 수평면 제어 알고리즘 개략도.	31
Fig. 4.2 Heading Control System Block Diagram.	33
Fig. 4.3 Heading Control Step Response.	33
Fig. 4.4 수직면 제어 알고리즘 개략도.	36
Fig. 4.5 Depth Control System Block Diagram.	36
Fig. 4.6 Depth control Step Response ($K_{zp} = 1.5, K_p = 3.4, K_d = 1.9$).	37
Fig. 4.7 Depth control Step Response ($K_{zp} = 0.65, K_p = 3.5, K_d = 1.9$).	38
Fig. 5.1 AUV의 underactuated 특성.	40
Fig. 5.2 AUV의 속력을 고려하지 않은 경로형성 시뮬레이션.	42
Fig. 5.3 Underactuated 특성을 고려하지 않은 시뮬레이션.	43
Fig. 5.4 Turning Simulation(30°).	44
Fig. 5.5 MTD를 적용한 조이스틱 모드 경로 추적 결과.	46
Fig. 5.6 웨이 포인트 모드 시뮬레이션 ($K_p = -2, K_d = -5$).	47
Fig. 6.1 AUV의 외형 및 치수.	49
Fig. 6.2 전장시스템 구성도.	50
Fig. 6.3 AUV Simulator 외형 및 구성.	53
Fig. 6.4 AUV Simulator 전장 구성.	54
Fig. 6.5 Simulator 구성.	55
Fig. 6.6 Simulator 알고리즘 블록 선도.	56
Fig. 6.7 Simulator GUI.	58
Fig. 6.8 Labview 코딩.	59
Fig. 6.9 시뮬레이터 실험 결과.	61
Fig. 6.10 목표 헤딩값에 의한 Simulator 추종 결과.	62
Fig. 6.11 CMPS03에 의해 측정된 Simulator 헤딩값.	63
Fig. 7.1 수평면상의 직진성 시험과 시뮬레이션 결과 비교.	64
Fig. 7.2 선회운동 시험과 시뮬레이션 결과 비교.	65
Fig. 7.3 웨이 포인트 시험과 시뮬레이션 결과 비교.	66
Fig. 7.4 깊이제어 시험과 시뮬레이션 결과 비교.	67

A study on the Development of AUV(Autonomous underwater vehicle) Dynamic Motion Control Simulator

Jong min Kim

*Department of Mechatronics Engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University*



Abstract

An Autonomous underwater vehicle is utilized in variety field for underwater circumstances. So we need to know the system of AUV to use properly. The motion of AUV can be defined as a 6 Degree of freedom dynamics model which is composed of the complex components. The dynamics model of Autonomous underwater vehicle includes hydrostatic force, hydro damping, fin force, added mass, thruster force. These variables control system in order to apply it to reflect the actual physical phenomenon about the characteristics of the various forces and the hull needs to be modeled mathematically. Set the path to take command of the driver and the path and progress of AUV heading to compensate for the difference between each Track angle error tracking algorithm and the PD controller via the control input value to minimize the error value was calculated. The dynamic simulation of AUV is based on Matlab program which can perform the horizontal, vertical , way-point tracking motion including 3 dimension points. And using Labview simulation was performed to configure the Simulator AUV

made applicable to the actual performance compared to the motion controller and the performance of the algorithm were verified.

Keywords : AUV(Autonomous Underwater Vehicle), PD Control, Simulator, Way-Point Tracking



제 1장 서론

1.1 연구 배경

해양자원에 대한 개발과 해양 공간 이용 등의 필요성이 증대되면서 무인 잠수정에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 해양 탐사 기술은 많은 경비가 소요되고 무엇보다도 인간이 수행하기에 해저 해양이라는 환경은 높은 수압, 전파감쇠, 해류나 파도, 낮은 시계 등의 위험 환경으로 인하여 무인화 기술을 요구하는 대표적 분야이다. 따라서 최근에는 ROV(Remotely Operated Vehicle), 자율무인 잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)등과 같은 무인잠수정이 각광 받고 있으며, 이에 대한 연구가 활성화 되고 있다. 1990년대까지 심해 탐사는 심해 예인장비와 유인잠수정 그리고 ROV에 의한 탐사가 주류를 이루었으나 2,000 년대에 들어서면서 AUV기술의 발전으로 AUV를 이용한 심해탐사 결과들이 가시적인 성과를 보이기 시작하였다. ROV는 모선과 테더(tether) 케이블을 이용하여 연결되어 있으며, 유선연결을 통해 전원을 공급받으며 운영자와 실시간 정보교환이 가능하다. 따라서 ROV는 심해에서 장시간의 운용이 가능하며, 복잡하면서도 정밀함이 요구되는 수중작업을 수행할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 모선과의 유선연결로 인해 작업영역과 이동속도 등이 제한되는 단점을 갖게 된다. 이와 비교하여 AUV는 모선과 어떠한 유선연결도 갖지 않으므로 비교적 넓은 지역을 빠르게 탐사하며 주어진 작업을 수행할 수 있는 장점을 갖는다. 따라서 ROV나 호버링 AUV에 의한 국부영역 정밀 작업의

중간 단계에서 필요한 맵핑 작업의 수행, 인간이 도달하기 힘든 극한 환경이나 케이블이 얽히기 쉬운 복잡한 환경의 탐사, 모선에서 적은 인력과 비용으로 다수를 동시에 운용하여 넓은 지역을 효과적으로 조사하는 것 등 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.[1][2][3]

AUV는 태양열 충전지를 가지고 수면으로 부상하여 충전하는 일부 AUV를 제외하고는 전원의 공급이 탑재된 배터리 용량에 전적으로 의존하기 때문에 작동 시간에 한계가 있으며, 수표면에서는 사용자의 지령을 무선 통신을 이용하여 명령을 입력받아 임무가 수행 가능하지만 수중에서는 사용자와 AUV간의 통신이 어려워져 주어진 임무가 끝나서 수면으로 떠오르기 전까지 AUV의 상태나 추가적인 명령전달의 어려움이 따른다. 따라서 AUV는 사용자의 조작을 최소화 하여 자체의 프로세서와 잠수정이 가진 센서, 액추에이터만을 이용하여 자율제어하기 때문에 효율적이고 안정적인 AUV의 운용을 위해서는 경로의 계획과 이를 추종할 수 있는 알고리즘 및 제어가 필요하다.

AUV의 경로계획 및 운동제어에 대하여 많은 연구들이 진행되고 있다. 2007년 Petres는 경로 계획에 따른 장애물의 감지/회피, 자율적 임무계획/수행에 대하여 연구 하였고 2008년 Jantapremjit와 Wilson은 포텐셜 장(potential field) 방법을 적용한 귀환 유도 제어를 연구 하였으며 2010년 김영식은 DP(dynamic programming)알고리즘을 AUV에 적용하여 수중진수장치로의 최적 귀환 경로를 생성하는 방법을 제안하였다.[4][5][6] 2007년 마성진은 PD제어기와 슬라이딩모드 제어기에 대한 외란 응답 특성에 대하여 연구 하였고 2009년 박성국 등은 'IsiMi100'에 PD제어기를 적용한 연구를 수행하였다.[7][8] AUV의 운동제어기는 수직면과 수평면 운동으로 나누어 구성되며 전통적인 PD제어기에서부터

모델의 불확실성과 외란을 극복하기 위해 퍼지이론, 신경망이론, 적응 제어이론, 슬라이딩모드 제어기 등의 접목이 연구 되었다.



1.2 연구 목적

정밀한 제어를 위해서는 자율제어에 반영되는 여러 가지 변수에 대한 이해가 요구된다. 이러한 변수를 제어 시스템에 적용하기 위해서는 실제 물리 현상을 잘 반영할 수 있도록 각종 외력 및 선체의 특성에 대해서 수학적으로 모델링할 필요가 있다. 이를 위해 AUV의 6자유도 운동 방정식을 연구 하고 운전자의 지령을 받아(Way-point) 경로(Global path)를 설정하고 경로와 AUV의 진행 헤딩각의 차이를 보정하는 Track angle error 알고리즘과 PD제어기를 통하여 추종에러 값을 최소화 시킬 제어입력 값을 구하였다.

Matlab을 통해 PD제어기에 의한 AUV의 운동방정식을 계산하여 AUV의 평면, 수직운동 및 조이스틱(Joystick) 모드 웨이 포인트 모드 운동 시뮬레이션을 수행 하였다. 또한 Labview를 이용한 Simulator를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였고 실제 제작한 AUV에 적용하여 운동성능을 비교 하여 제어기 및 알고리즘의 성능을 검증하였다.

제 2장 AUV의 동역학 모델

2.1 AUV의 운동좌표계

수중의 3차원 공간에서 운동하는 무인잠수정은 6자유도(6 degree of freedom)운동을 한다. 이러한 운동은 2개의 좌표계를 설정하여 표현하는 것이 편리하다. 일반적으로 AUV의 운동 방정식을 기술하기 위해 전역좌표계(global coordinate)와 몸체고정좌표계(body fixed coordinate) 2개를 정의한다. 간단한 형태의 방정식을 얻기 위해 몸체고정좌표계의 좌표중심이 AUV의 무게중심과 일치한다고 가정한다. 또한 Z축을 제외한 몸체고정좌표계의 중심과 선체의 부력중심이 일치한다고 가정한다. 좌표계와 명칭은 Fig. 2.1과 Table 2.1에 나타내었다.[10]

Body fixed coordinate

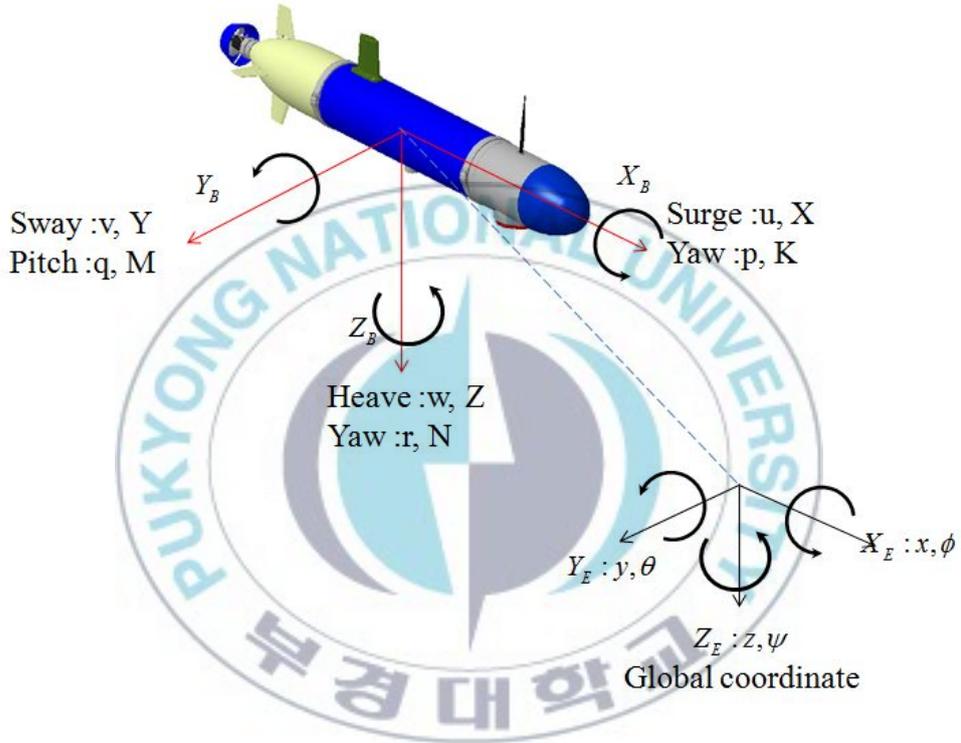


Fig. 2.1 AUV의 좌표계.

Table. 2.1 AUV 6자유도 운동변수[10]

DOF		Forces[N]	Linear velocity[m/s]	Position[m]
1	Motion in the x-direction (surge)	X	u	x
2	Motion in the y-direction (sway)	Y	v	y
3	Motion in the z-direction (heave)	Z	w	z

DOF		Moments[Nm]	Angular velocity[rad/s]	Euler angles[rad]
4	Rotate about the x-axis (roll)	K	p	ϕ
5	Rotate about the y-axis (pitch)	M	q	θ
6	Rotate about the z-axis (yaw)	N	r	ψ

6자유도 운동에서 변수는 Table. 2.1과 같다. $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$, $\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ 는 각각 전역 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 전역 좌표계에는 다음과 같은 관계가 있다.[10]

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (2.1)$$

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.2)$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

기준 좌표계와 물체 고정 좌표계를 설정하게 되면 기준 좌표계에 대해 선체의 물체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 식(2.3)은 오일러 각의 기준 좌표계를 X-Y-Z 축에 대하여 회전시켜 선체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로서, 회전은 ψ (yaw angle), θ (pitch angle), ϕ (roll angle)의 순서로 정한다. 식(2.4)에서 오일러 각의 경우 자율무인잠수정의 피치각이 수직에 가까워지면 분모의 값이 0 이 되는 불능상태가 된다. 하지만 일반적인 자율무인잠수정의 경우 수직에 가까운 운동이 거의 일어나지 않으므로 좌표 변환 시 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

2.2 AUV의 6자유도 동역학 모델

본 논문의 대상 물체인 무인잠수정은 수중을 운항하는 항체이다. 일반적으로 6개의 자유도를 가지는 수중 운동체는 12개의 상태 변수를 사용하여 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다. x - z 평면과 x - y 평면에 대해서 선체형상이 대칭이라고 한다면, 관성곱 I_{xy}, I_{yz}, I_{xz} 는 주관성모멘트 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 주관성 모멘트의 값은 부록 A에 나타내었다. 관성곱을 무시한 6자유도 운동 방정식은 식(2.5)와 같다.[10]

$$\begin{aligned}
 m[(\dot{u}-vr+wq)-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})] &= \sum X \\
 m[(\dot{v}-wp+ur)-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})] &= \sum Y \\
 m[(\dot{w}-uq+pv)-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})] &= \sum Z \\
 I_{xx}\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr+m[y_G(\dot{w}+pv-qu)-z_G(\dot{v}+ru-pw)] &= \sum K \\
 I_{yy}\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})rp+m[z_G(\dot{u}+wq-vr)-x_G(\dot{w}+pv-uq)] &= \sum M \\
 I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq+m[x_G(\dot{v}-wq+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)] &= \sum N
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

식(2.5)에서 우측의 항들은 자율무인잠수정에 작용하는 힘과 모멘트를 나타내며 부력과 중력 차이에 의한 힘과 모멘트, 부가질량(Added mass)에 의한 힘과 모멘트, Drag에 의한 힘과 모멘트, 제어판(스턴, 러더)에 의한 힘과 모멘트, 추진기에 의한 힘과 모멘트를 말한다. 우항과 관련된 내용은 3장에서 다루고자 한다.

제 3장 AUV의 유체항력

3.1 Hydrostatic Force

유체정역학적 힘은 AUV의 무게와 부력에 의해서 발생하는 힘과 모멘트를 의미한다. 무게 $W=mg$, 부력 $B=\rho Vg$ 로 나타내어지며, m 은 선체의 무게, g 는 중력가속도, ρ 는 주변 유체밀도, V 는 선체의 부피이다. 이때, 무게와 부력은 **Body-fixed coordinate**, 외부의 힘은 **Global coordinate**이므로 좌표변환 행렬 식(2.3)을 이용하여 식(3.1)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$f_G(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad f_B(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

유체정역학적 힘과 모멘트는 식 (3.2)로 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{HS} &= f_G - f_B \\ M_{HS} &= r_G \times f_G - r_B \times f_B \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서, F_{HS} 는 무게와 부력의 차에 의해 발생하는 힘을 뜻하며, M_{HS} 는 선체의 무게중심과 부력중심의 차이에 의해 발생하는 모멘트를 의미한다.

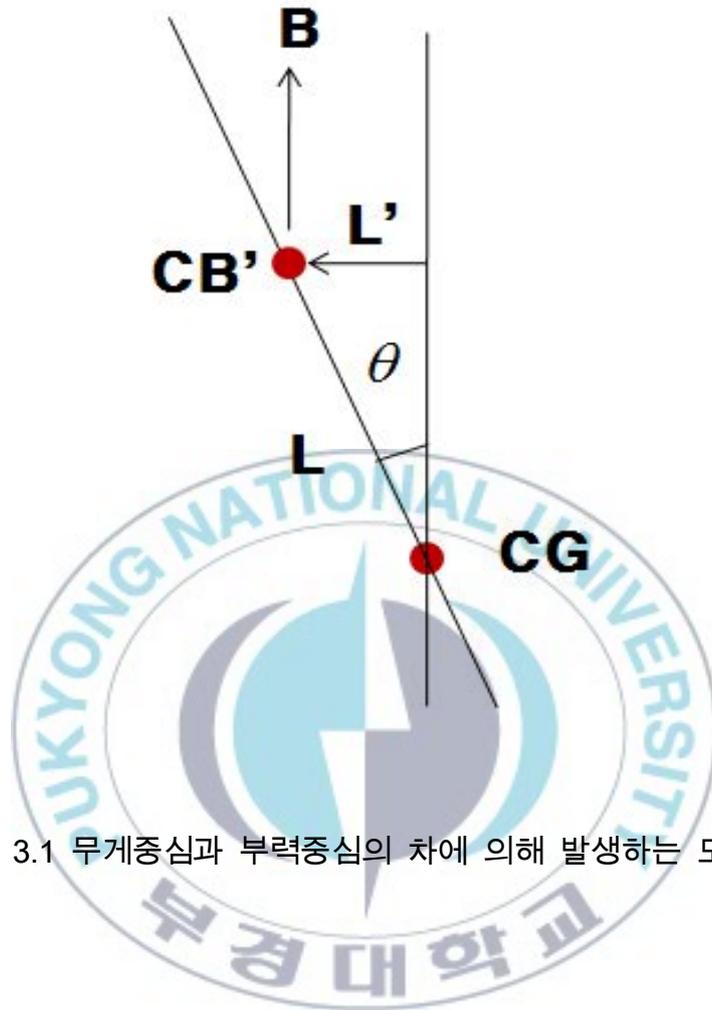


Fig. 3.1 무게중심과 부력중심의 차에 의해 발생하는 모멘트.

Fig. 3.1과 같이 무게중심과 부력중심의 차이로 인해 발생하는 모멘트가 선체의 pitch와 roll에 대해서 유체정역학적 안정성과 관련된다. 좌표 변환행렬 (2.3)의 역변환을 식(3.1)에 대입하면 식(3.3)과 같다.

$$X_{HS} = -(W - B)\sin\theta$$

$$Y_{HS} = (W - B)\cos\theta\sin\phi$$

$$Z_{HS} = (W - B)\cos\theta\cos\phi$$

(3.3)

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

$$M_{HS} = -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi$$

$$N_{HS} = -(x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi - (y_g W - y_b B)\sin\theta$$



3.2 부가질량(Added Mass)

선체가 유체 속에서 운동하기 위해서는 선체 부피만큼의 유체를 밀어내야한다. 이때 물체가 가속되고 있다면 선체를 둘러싸고 있는 주변 유체도 함께 가속된다. 그로인해 물체는 질량이 증가된 듯 느껴지는데 이를 유체역학적 질량 또는 부가질량이라고 한다.[10]

x-z평면과 x-y평면에 대해서 선체형상이 대칭이라고 한다면 식(3.4)와 같이 부가질량 행렬로 나타낼 수 있다.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

식(3.4)을 Kirchhoff방정식에 대입하여 식(3.5)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
X_A &= X_u \dot{u} + Z_w wq + Z_q \dot{q}^2 - Y_v vr - Y_r r^2 \\
Y_A &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + X_u ur - Z_w \wp - Z_q pq \\
Z_A &= Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} - X_u uq + Y_v vp + Y_r rp \\
K_A &= K_p \dot{p} - (Y_v - Z_w)vw - (Y_r + Z_q)wr + (Y_r + Z_q)vq - (M_q - N_r)qr \\
M_A &= Z_q (\dot{w} - uq) + M_q \dot{q} - (Z_w - X_u)wu - Y_r vp + (K_p - N_r)rp \\
N_A &= Y_r \dot{v} + N_r \dot{r} - (X_u - Y_v)_{uv} + Y_r ur + Z_q \wp - (K_p - M_q)pq
\end{aligned} \tag{3.5}$$

각 유체력 계수들은 경험식 또는 추정식을 이용하여 구할 수 있으며 본 논문에 쓰인 계수들은 Remus 유체력 계수들을 참고하였다.



3.3 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.[10]

항력의 크기 F_d 는 유체에 대한 상대 속력을 $v(m/s)$, 유체의 밀도를 ρ (Kg/m^3), 물체의 단면적을 $A(m^2)$ 라고 할 때, 항력은 식(3.6)과 같이 구성된다.[13]

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \\ K_D \\ M_D \\ N_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{u|u|} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v|} & 0 & 0 & 0 & Y_{r|r|} \\ 0 & 0 & Z_{w|w|} & 0 & Z_{q|q|} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{p|p|} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{w|w|} & 0 & M_{q|q|} & 0 \\ 0 & N_{v|v|} & 0 & 0 & 0 & N_{r|r|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u| \\ v|v| \\ w|w| \\ p|p| \\ q|q| \\ r|r| \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.4 제어판에 의한 힘과 모멘트

본 논문에서 사용된 무인잠수정에는 수직방향 위아래로 부착된 2개의 방향타(rudder)와 수평방향 좌우로 부착된 2개의 방향타(stern)가 무인잠수정의 운동을 제어한다. 제어판에 작용하는 힘은 크게 항력과 양력으로 나눌 수 있으며 항력은 유체의 흐름과 평행하게 같은 방향이고 양력은 항력의 수직 방향이다. 양력과 항력은 제어판의 직 압력에 의해서 생기게 된다. 직 압력을 구하는 식은 식(3.7)과 같이 나타낼 수 있고 제어판 유입 각은 Fig. 3.2와 같이 구할 수 있다.[13]

$$F_N = \frac{\rho}{2} A_F U_F^2 f_a \sin \alpha_f \quad (3.7)$$

(A_F : 제어판 면적, ρ : 유체 밀도, U_F : 제어판 유효 유입 속도, α_f : 제어판 유입각 f_a : 직 압력계수)

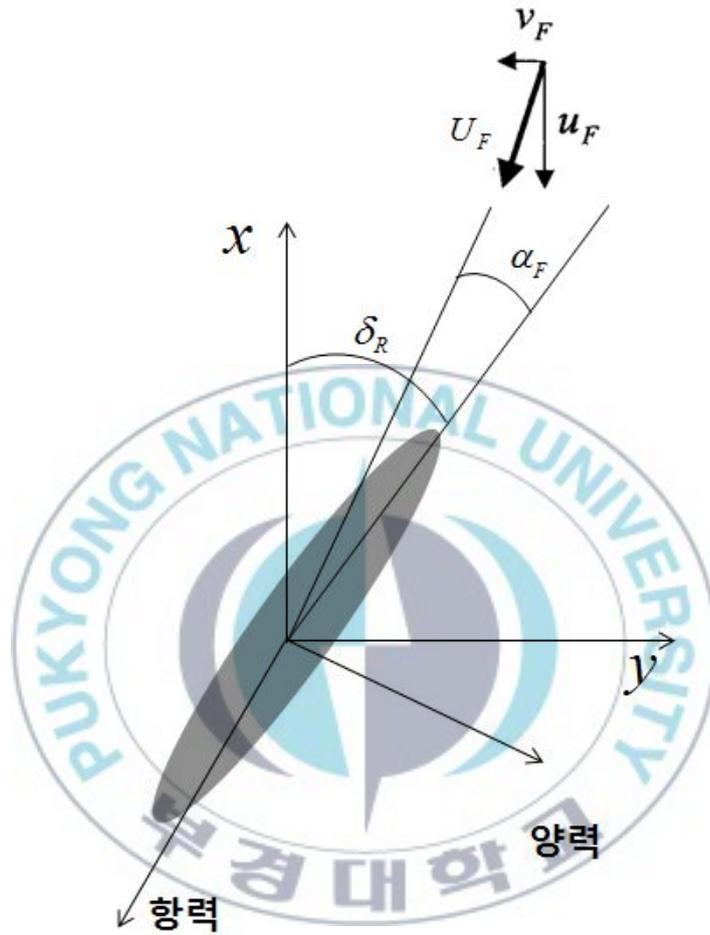


Fig. 3.2 방향타 유입각.

AUV는 2개 방향타의 양력 및 모멘트 계수와 관련된 내용은 각각 식 (3.8), (3.9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_{uu\delta_r} &= -Y_{wf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} \\
 Z_{uu\delta_s} &= Z_{wf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} \\
 Y_{wf} &= -Z_{uf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
 M_{uu\delta_s} &= M_{wf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \\
 N_{uu\delta_r} &= -N_{wf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \\
 M_{uf} &= N_{wf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}^2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

계산 되어진 값은 [부록 A]에 첨부하였다.

3.5 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 좌우스턴에 적절한 각도를 주면 상쇄시킬 수 있다.



3.6 외력과 모멘트

본 논문에서는 선형 관성력, 선형 감쇠, 비선형 감쇠와 관련된 유체항력 계수를 고려하여 식(3.10) ~ (3.15)와 같이 유체항력 모델을 구성하였다.

$$\sum X = X_{HS} + X_{uu}u^2 + X_u\dot{u} + X_{uq}uq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{prop} \quad (3.10)$$

$$\sum Y = Y_{HS} + Y_{vv}v^2 + Y_{rr}r^2 + Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{\rho\delta} \quad (3.11)$$

$$+ Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{u\delta_r}u^2\delta_r$$

$$\sum Z = Z_{HS} + Z_{ww}w^2 + Z_{qq}q^2 + Z_w\dot{w} + Z_q\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp \quad (3.12)$$

$$+ Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{u\delta_s}u^2\delta_s$$

$$\sum K = K_{HS} + K_{pp}p^2 + K_p\dot{p} + K_{prop} \quad (3.13)$$

$$\sum M = M_{HS} + M_{ww}w^2 + M_{qq}q^2 + M_w\dot{w} + M_q\dot{q} + M_{uq}uq \quad (3.14)$$

$$+ M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{u\delta_s}u^2\delta_s$$

$$\sum N = N_{HS} + N_{vv}v^2 + N_{rr}r^2 + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{ur}ur \quad (3.15)$$

$$+ N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{u\delta_r}u^2\delta_r$$

3.7 운동 방정식

지금까지의 내용을 정리하여 나타낸 운동 방정식이다.

$$m[(\dot{u}-vr+wq)-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})] = (1)$$

$$X_{HS} + X_{uu}u^2 + X_u\dot{u} + X_{uq}wq + X_{qq}q^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{prop}$$

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

$$Y_{HS} + Y_{vv}v^2 + Y_{rr}r^2 + Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{\phi\phi}$$

$$+ Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r$$

$$m[(\dot{w}-uq+pv)-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})] = (3)$$

$$Z_{HS} + Z_{ww}w^2 + Z_{qq}q^2 + Z_w\dot{w} + Z_q\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp$$

$$+ Z_{uw}uw + Z_{uudeltas}u^2\delta_s$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] = (4)$$

$$K_{HS} + K_{pp}p^2 + K_p\dot{p} + K_{prop}$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_G(\dot{u} + wq - vr) - x_G(\dot{w} + pv - uq)] = (5)$$

$$M_{HS} + M_{ww}w^2 + M_{qq}q^2 + M_w\dot{w} + M_q\dot{q} + M_{uq}uq$$

$$+ M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uudeltas}u^2\delta_s$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wq + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = (6)$$

$$N_{HS} + N_{vv}v^2 + N_{rr}r^2 + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{ur}ur$$

$$+ N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r$$

(3.12)

제 4 장 AUV 제어기 설계

무인 잠수정의 제어에 적용한 제어 알고리즘에 대해 고찰하고자 한다. AUV제어기는 보편적으로 제어가 간편하고 널리 쓰이는 PD제어기를 설계 하였다. 제어기는 6자유도 운동방정식을 수직면 운동과 수평면 운동으로 분리 시켜 수직면 제어기와 수평면 제어기로 나누어 구성하였다. 2가지의 제어가 원활히 이루어져야 3차원 공간상의 원하는 위치에 잠수정을 보내는 것이 가능하다. 시뮬레이션은 무인잠수정의 수평면, 수직면에 대해 독립적으로 설계된 제어 알고리즘을 적용하여 요구되는 방향타 제어 입력을 계산하였고, 유체항력 계수들은 Remus계수들을 참고하였다. 또한 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.

4.1 운동 방정식의 선형화

4.1.1 수평면 운동 선형화

수평면에서 움직이는 AUV의 운동은 X축, Y축 병진운동(surge, sway) Z축 방향으로의 회전운동(yaw)만을 고려하게 된다.

Surge, sway, yaw운동만 있으므로 나머지 요소 Heave, roll, pitch요소는 무시할 수 있다.

$$w = 0, \dot{z} = 0, \dot{\phi} = \dot{\theta} = 0, p = q = 0 \quad (4.1)$$

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 무인 잠수정의 무게중심은 $CG = [x_G, y_G, z_G] = [0 \ 0 \ 0.02m]$ 이므로 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0, \quad x_G = y_G = 0 \quad (4.2)$$

식(3.12)의 6자유도 운동방정식에 식(4.1)과 식(4.2)를 적용하여 단순화시키면 식(4.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
m(\dot{u}-vr) &= \sum X \\
m(\dot{v}+ur) &= \sum Y \\
I_{zz}\dot{r} &= \sum N
\end{aligned} \tag{4.3}$$

수평면 운동 시 일정한 속도로 운동을 하고 외란이 없다고 가정 했을 때 선체 고정 좌표계 Z방향으로의 모멘트인 N성분이 수평면 운동에 주된 영향을 미친다.

3장의 식(3.12)의 (6)번 식에 위에서 가정한 식 (4.1)과 (4.2)를 대입하고 유체역학적 힘과 모멘트인 유체정역학적 성분, 부가질량에서 0의 값을 가지는 커플링 성분, 방향타에 의한 성분 그리고 Drag의 2차 이상 고차항 성분을 선형화 한 후의 식은 식(4.4)와 같다.

$$(I_{zz} - N_r)\dot{r} = N_r r + N_{\delta_r} \delta_r \tag{4.4}$$

4.1.2 수직면 운동 선형화

XZ평면에서만 움직이는 AUV의 운동은 X축, Z축 병진운동(heave, Surge)과 Y축 방향으로의 회전운동(pitch)운동만을 고려하게 된다.

Surge, heave, pitch 운동만 있으므로 나머지 요소 sway, roll, yaw 요소는 무시할 수 있다.

$$v = 0, \dot{y} = 0, \dot{\phi} = \dot{\psi} = 0, p = r = 0 \quad (4.5)$$

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(4.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0, x_G = y_G = 0 \quad (4.6)$$

식(3.12)의 6자유도 운동방정식을 식(4.5), (4.6)을 적용해서 단순화시키면 식(4.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
m(\dot{u} + wq + z_G \dot{q}) &= \sum X \\
m(\dot{w} - uq - z_G q^2) &= \sum Z \\
I_{yy} \dot{q} + m[z_G(\dot{u} + wq)] &= \sum M
\end{aligned} \tag{4.7}$$

수평면 운동 시 일정한 속도로 운동을 하고 외란이 없다고 가정 했을 때 선체 고정 좌표계 Y방향으로의 모멘트인 M성분이 수평면 운동에 주된 영향을 미친다.

3장의 식(3.12)의 (5)번 식에 위에서 가정한 식 (4.5)와 (4.6)을 대입하고 유체역학적 힘과 모멘트인 유체정역학적 성분, 부가질량에서 0의 값을 가지는 커플링 성분, 방향타에 의한 성분 그리고 Drag의 2차 이상 고차항 성분을 선형화 한 후의 식은 식(4.8)와 같다.

$$(I_{yy} - M_{\dot{q}}) \dot{q} = M_q q - z_G W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \tag{4.8}$$

4.2 제어기 설계

4.2.1 PD제어기

방향 제어를 위해 PD제어기를 설계한다. 비례-적분-미분 제어기(PID 제어기)는 실제 응용분야에서 가장 많이 사용되는 대표적인 형태의 제어기법이다. 구조가 간단하며 제어성능이 우수하고 제어이득 조정이 비교적 쉬운 편이다. 산업현장에서 약 80%이상을 차지하며 비례제어, 적분제어와 미분제어를 단독으로 쓰거나 혹은 두 가지 이상을 결합한 형태로 사용한다. 수중에서 운항하는 AUV의 경우 **underactuated** 특성을 지니기 때문에 정상 상태에 도달이 힘들뿐만 아니라 적분기의 와인드업을 피하고자 PD제어기만을 사용 하였다. 앞서 언급한 **underactuated** 특성에 대해선 다음 장에서 설명 하도록 하겠다.

4.2.2 수평면 제어기 설계

선형화한 수평면 운동 모델의 시스템이 가제어성을 확인한다. 상태 공간형식(state-space form) 으로 나타내기 위하여 식(4.4)를 벡터형식으로 나타내면 식(4.9)과 같다. 이때 $\dot{\psi}=r$ 이다.

$$\begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.9)$$

선형화된 수평면 운동식의 피드백 제어를 적용하기 위해서는 가제어성 및 가관측성을 만족해야 한다. 이를 위해 식(4.9)를 상태 공간행렬로 나타내면 식(4.10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.10)$$

식(4.10)를 정리하면 식(4.11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_{zz} - N_r} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.11)$$

3장에서 정의한 유체항력 계수 값을 식(4.11)에 대입하여 정리하면 식(4.12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8247 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.7383 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4.12)$$

가제어성 행렬 $S = [B, AB, A^2B, A^3B, \dots, A^{n-1}B]$ 일 때, $\text{rank}(S) \geq n$ 이면 제어가능이고 $\text{rank}(S) < n$ 이면 불가제어이다. 이때 n 은 시스템의 차수를 나타내는 A, B 행렬의 행의 수이다. 선형화된 시스템의 rank 는 MATLAB을 사용해 구하였다. 계산된 이 시스템의 rank 는 2이므로 가제어 상태를 알 수 있고 PD제어기 설계를 통해 제어가 가능하다.

PD제어기를 설계하기 위해서 입력값과 출력값에 대한 개루프 전달함수는 식(4.13)과 같은 방법으로 구하였다. 유체항력 계수 값을 식(4.13)에 대입하여 식(4.14)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} &= N_r r + N_{\delta_R} \delta_R \\ (I_{zz} - N_{\dot{\psi}})\dot{\psi} &= N_r \psi + N_{\delta_R} \delta_R \\ (I_{zz} - N_{\dot{r}})S^2 \psi(s) &= N_r S \psi(s) + N_{\delta_R} \delta_R(s) \\ \{(I_{zz} - N_{\dot{r}})S^2 - N_r S\} \psi(s) &= N_{\delta_R} \delta_R(s) \\ \frac{\{(I_{zz} - N_{\dot{r}})S^2 - N_r S\}}{N_{\delta_R}} &= \frac{\delta_R(s)}{\psi(s)} \\ \frac{N_{\delta_R}}{\{(I_{zz} - N_{\dot{r}})S^2 - N_r S\}} &= \frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} \\ \frac{N_{\delta_R}}{s(s - \frac{N_r}{I_{zz} - N_{\dot{r}}})} &= \frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} \end{aligned} \quad (4.13)$$

시스템의 개루프 전달 함수를 구해보면 식(4.14)와 같다.

$$G = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{\frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r}}{s(s - \frac{N_r}{I_{zz} - N_r})} = \frac{-0.7383}{s(s + 0.8247)} \quad (4.14)$$

AUV의 제어 입력 δ_r 과 비례상수 K_p , 미분상수 K_d 의 관계식은 식(4.15)와 같다.

$$\delta_r = K_p(\psi^w - \psi^e) - K_d\dot{\psi}^e \quad (4.15)$$

AUV의 제어 입력 δ_r 은 사용자의 명령에 의해 주어지는 웨이 포인트가 주어지게 되면 AUV에 장착 되어 있는 센서(GPS, DVL, IMU, Depth sensor)를 이용하여 현재 AUV의 위치 및 자세정보와 웨이 포인트의 좌표 이용하여 추종 heading 값(ψ^w)을 구하고 추종 heading값과 현재 AUV의 heading값의 상태 오차를 구한다. 상태 오차에 비례 계인을 곱하고 상태 오차의 시간에 따른 변화량에 미분 계인을 곱하여 계산한다. 연산 되어진 제어 입력에 따라 AUV의 움직임이 결정되고 주어진 목표까지 이동하게 된다. PD컨트롤 알고리즘의 개략도를 Fig.4.1에 나타 내었다.

시스템의 폐루프 전달함수는 식(4.16)과 같다.

$$G(s) = \frac{-0.7383(K_p + K_d s)}{s^2 + (0.8247 - 0.7383K_d)s - 0.7383K_p} \quad (4.16)$$

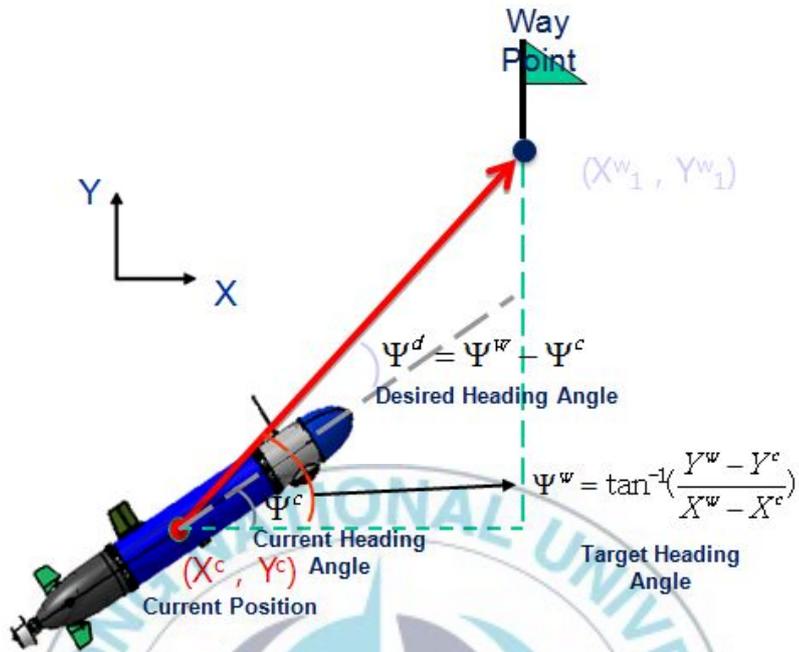


Fig. 4.1 수평면 제어 알고리즘 개략도.

Fig. 4.2와 같이 시뮬링크를 이용 하여 제어시스템을 구성하여 시행 착오법을 이용하여 비례상수(K_p)와 미분상수(K_d)를 구하였다. 제작된 무인 잠수정의 방향타 운동 최대 각이 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 이기 때문에 움직임에 한계를 두었다. 구해진 값은 각각 $K_p=-1.0501$, $K_d=-1.8207$ 이고 Fig. 4.3(a)에 결과를 도시 하였다. 오버슈트가 발생하지 않고 목표 값에 잘 추종하고 있으나 정착시간이 너무 길어 $K_p=-3$ 으로 증가 시켜 그 응답을 Fig. 4.3(b)에 나타내었다.



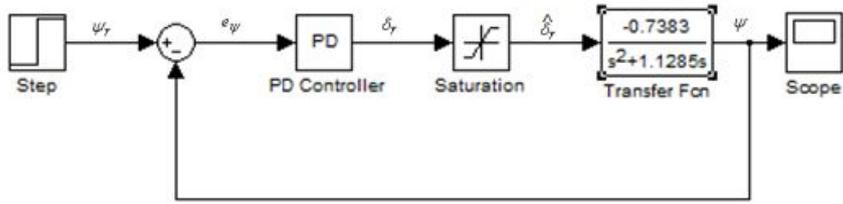
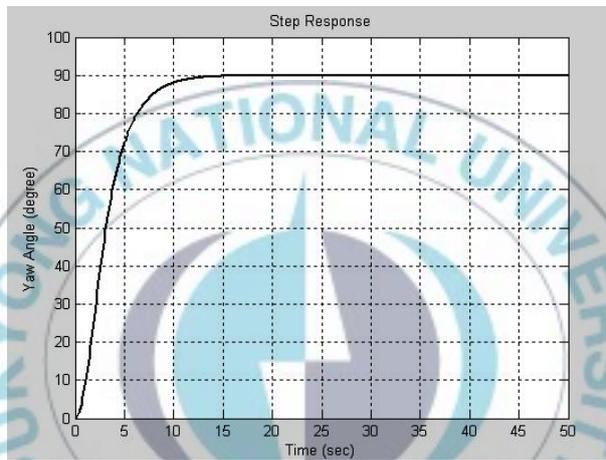
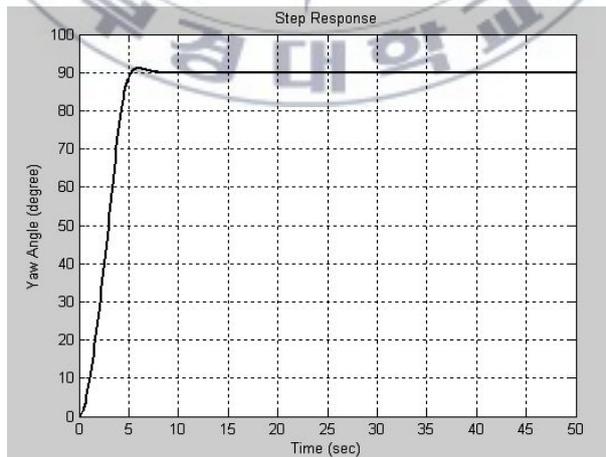


Fig. 4.2 Heading Control System Block Diagram.



(a) $K_p = -1.0501$, $K_d = -1.8207$



(b) $K_p = -3$, $K_d = -1.8207$

Fig. 4.3 Heading Control Step Response.

4.2.3 수직면 제어기 설계

수평면과 동일한 방법으로 선형화된 수직면 운동 방정식을 상태 공간 형식으로 나타내면 식(4.17)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_{yy} - M_q} & \frac{-z_G W}{I_{yy} - M_q} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s]$$

$$z = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

AUV가 1.0m/s의 정속으로 운항할 때, 부록의 계수 값을 참고하여 수치를 대입하면 식(4.18)과 같다. rank = 3이므로 제어 가능하다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8247 & -1.1749 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.1537 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (4.18)$$

수직면 제어기의 개루프 전달 함수를 구해 보면 식(4.19)와 식(4.20)과 같이 구해진다.

$$G_{Plant} = \frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{\frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q}}{s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q}s + \frac{z_G W}{I_{yy} - M_q}} = \frac{-4.1537}{s^2 + 0.8247s + 1.1749} \quad (4.19)$$

$$G_z = \frac{z(s)}{\theta(s)} = -\frac{U}{s} = -\frac{1}{s} \quad (4.20)$$

깊이 제어기는 스티어링 방향타에 따른 종동요각과 스티어링 방향타에 따른 무인잠수정의 깊이로 나눌 수 있다.

PD제어기에 적용할 입력각 δ_s 과 비례상수 K_p , 미분상수 K_d 의 관계식은 식(4.21)와 같다.

$$\delta_s = k_{zp}(z^d - z^c) + k_p\theta^c + k_d\dot{\theta} \quad (4.21)$$

수직면 제어기의 계략도는 Fig. 4.4과 같다. 깊이 오차에 대한 P제어와 종동요에 대한 PD제어만 존재한다. 종동요 PD제어기에서 현재 피칭각을 추종하는 이유는 하이드로 스테틱 포스에 의한 복원력 때문에 항상 목표 피칭각은 0° 이기 때문이다. Fig. 4.5와 같이 시뮬링크를 이용하여 제어시스템을 구성하여 시행착오법을 이용하여 계인값은 $K_{zp} = 1.5$, $K_p = 3.4$, $K_d = 1.9$ 이고 이에 대한 응답을 Fig. 4.6에 나타내었다. 정착시간이 짧지만 AUV의 피칭각도가 45° 를 넘는 움직임은 현실적으로 불가능하기에 계인값을 튜닝하여 $K_{zp} = 0.65$, $K_p = 3.4$, $K_d = 1.9$ 정착 시간은 느리지만 목표치인 $-5m$ 에 안정적으로 도달하고 있다.

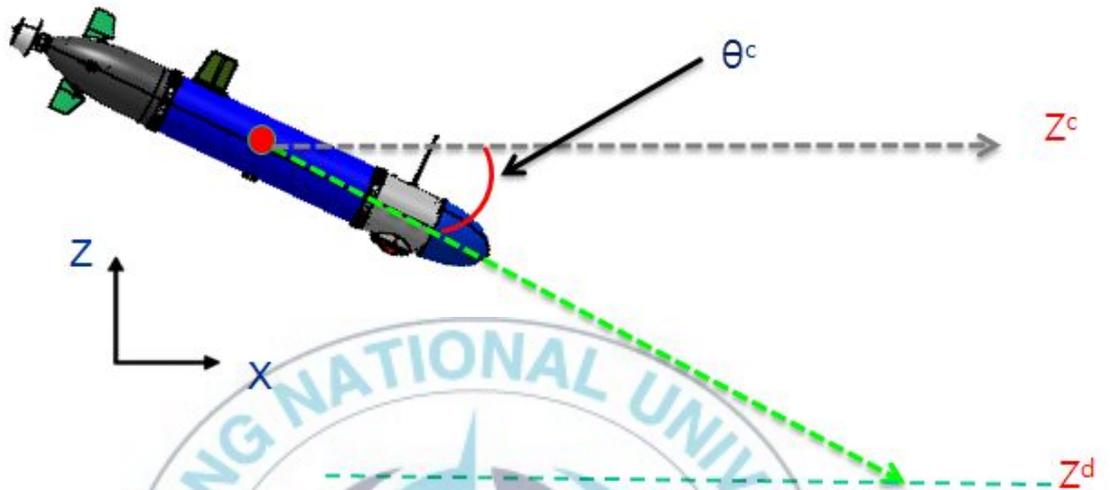


Fig. 4.4 수직면 제어 알고리즘 개략도.

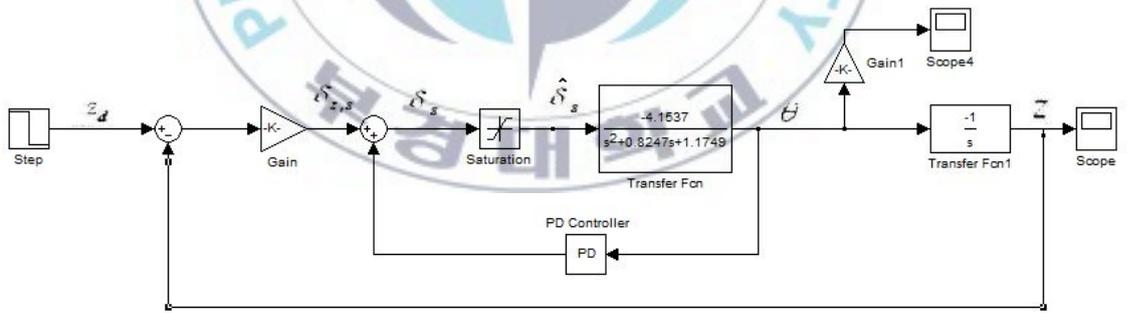


Fig. 4.5 Depth Control System Block Diagram.

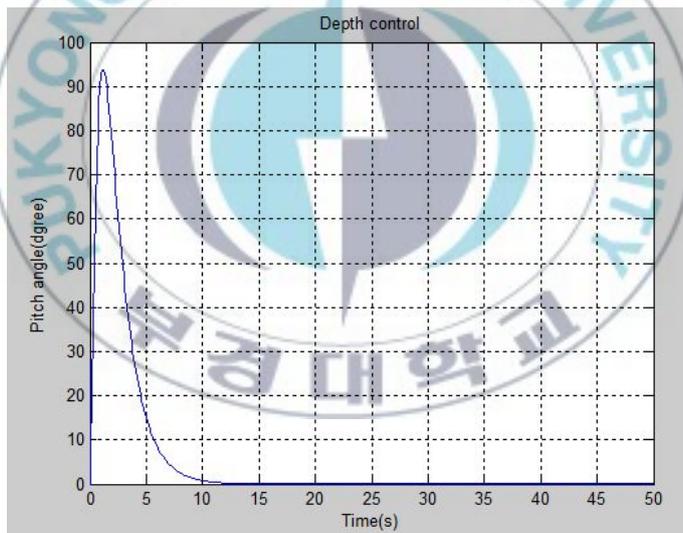
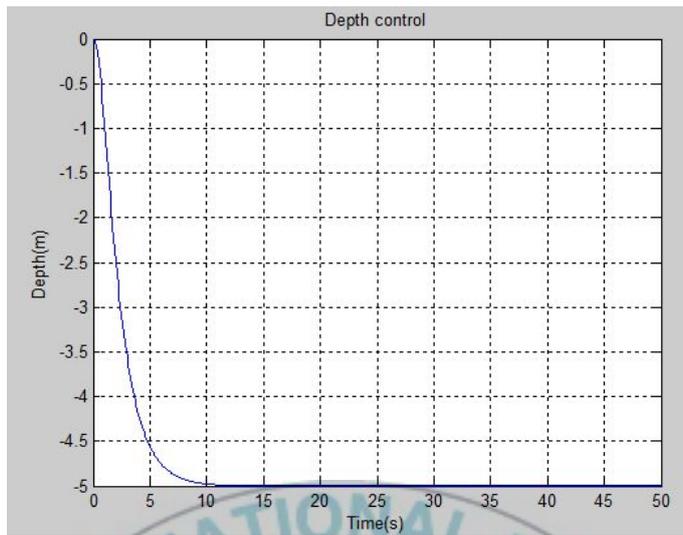


Fig. 4.6 Depth control Step Response ($K_{zp} = 1.5$, $K_p = 3.4$, $K_d = 1.9$).

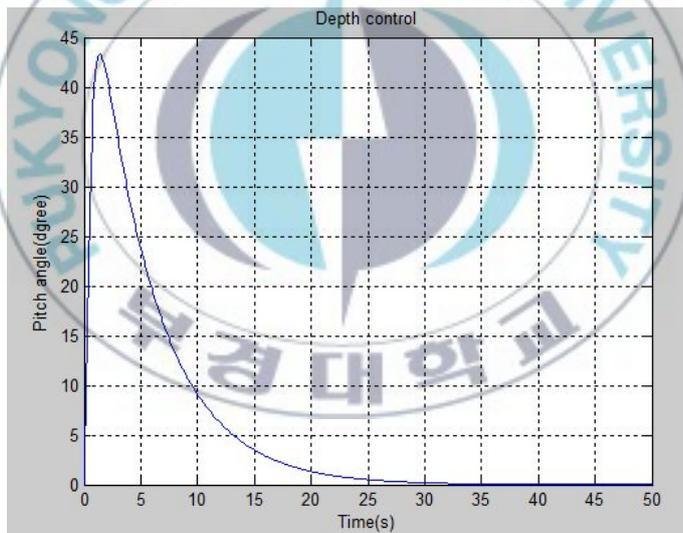
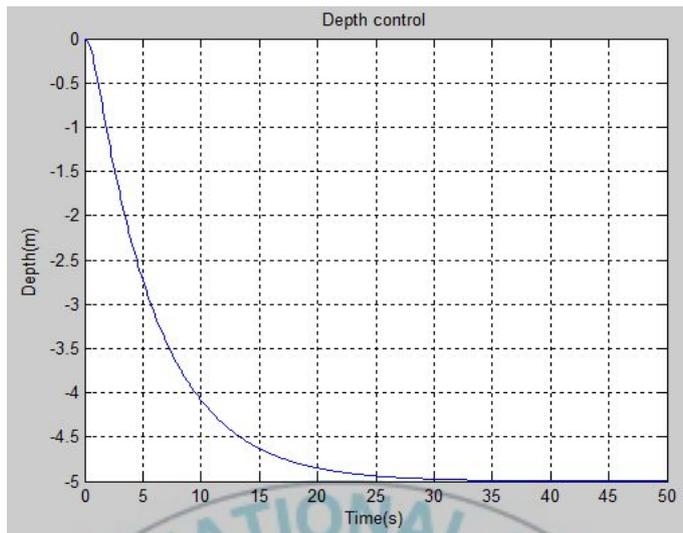


Fig. 4.7 Depth control Step Response ($K_{zp} = 0.65$, $K_p = 3.5$, $K_d = 1.9$).

제 5장 AUV 운동제어 시뮬레이션

5.1 AUV의 underactuated 특성

4장의 제어기 설계에서 AUV는 underactuated 특성에 의해서 정상 상태에 도달하기 힘들다는 점을 논하였다. 어떤 시스템이 움직일 수 있는 평면의 작업 공간에서 시스템의 위치를 정의하는 정규 격자를 고려해 보아야 한다. Underactuated system이 아닌 일반 로봇, 즉 각 자유도 방향으로의 구동력을 생성하는 구동장치를 모두 가지고 있는 로봇의 경우, Fig. 5.1의 우측에 보이는 바와 같이 로봇은 전후 및 좌우의 모든 방향으로 이동할 수 있다. 그러나 underactuated system의 경우에는 모든 방향이 아닌 장착된 구동장치의 조건에 따라 제한되는 방향으로만 이동할 수 있다. Fig. 5.1의 좌측에 도시한 그림은 이러한 underactuated system인 어뢰형 AUV의 경우에 한 지점에서 AUV가 이동 가능한 위치의 격자들을 보이고 있다. 그림을 통하여 확인 할 수 있듯이 본 연구의 대상이 되는 AUV의 경우에는 선수 방향으로의 좁은 각도 내에 존재하는 위치로만 AUV가 이동 가능하다. 따라서 AUV의 경로를 계획 할 때, 이러한 underactuated system의 특성을 고려하지 않는다면 AUV가 움직일 수 없는 경로, 즉 의미 없는 경로를 생성할 수도

있다.[6] AUV의 시뮬레이션은 조이스틱 모드로 구동하는 시뮬레이션과 사용자에게 목표 지점을 입력 받아 운행하는 웨이 포인트 모드 2가지에 대하여 수행 하였다.

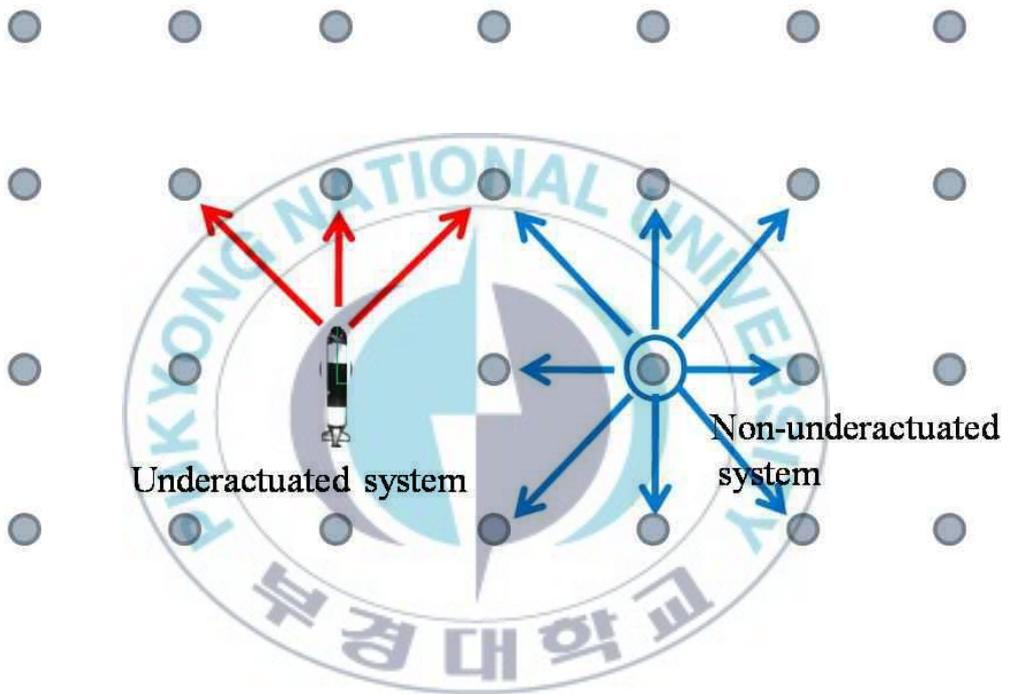


Fig. 5.1 AUV의 underactuated 특성.[6]

5.2 시뮬레이션 제약조건 분석

조이스틱 모드는 사용자의 키 입력을 받아 일정한 경로를 형성하여 궤적을 추적하는 시뮬레이션을 말하며 웨이 포인트 모드는 사용자의 지령을 받아 일정 목표 지점을 자율운항 하는 모드이다. 이 두 가지 모드에 대하여 시뮬레이션을 수행 시에 몇 가지 제약 조건이 발생 하게 된다.

- 1) AUV의 속력은 일정하다고 정의 하였다.
- 2) Underactuated 특성에 의해서 경로 계획 알고리즘이 없이는 급격한 선회 운동은 불가능 하다.

위의 두 가지 제약 조건을 고려하지 않은 경로의 시뮬레이션 결과를 Fig. 5.2와 5.3에 나타내었다. AUV의 진행 속도 보다 패스 형성이 느리게 되면 목표 패스를 찾지 못하고 Fig. 5.2와 같이 AUV가 불안정한 움직임을 보임을 확인 하였다. 또한 Fig. 5.3에서 볼 수 있듯이 급격한 방향 전환이 있을 시에도 AUV의 움직임이 불안정 하였다.

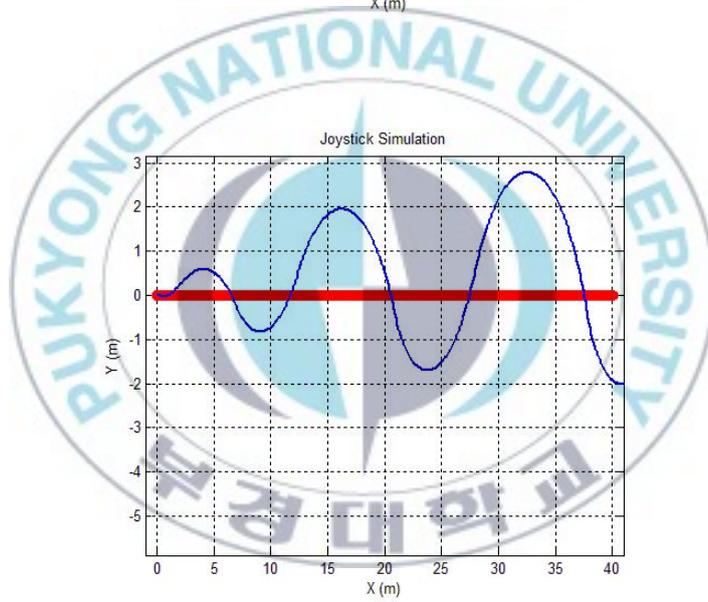
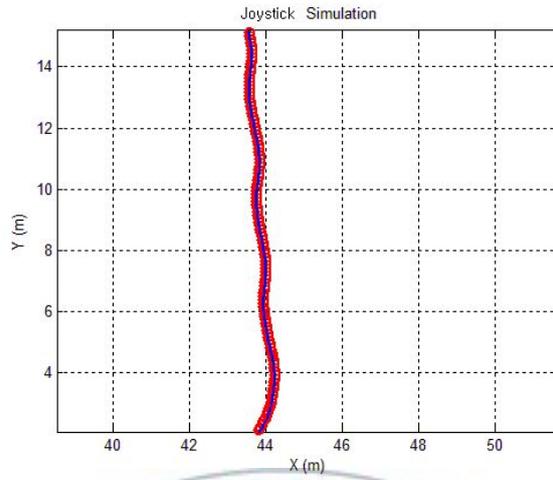


Fig. 5.2 AUV의 속력을 고려하지 않은 경로형성 시뮬레이션.

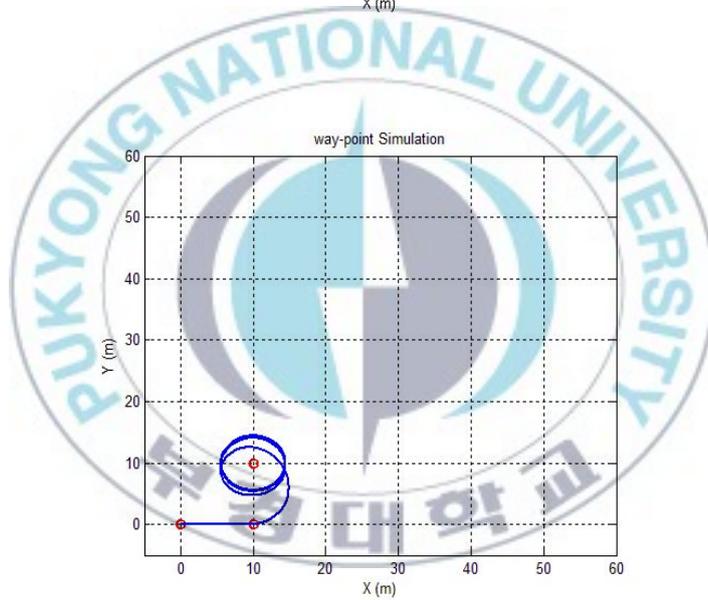
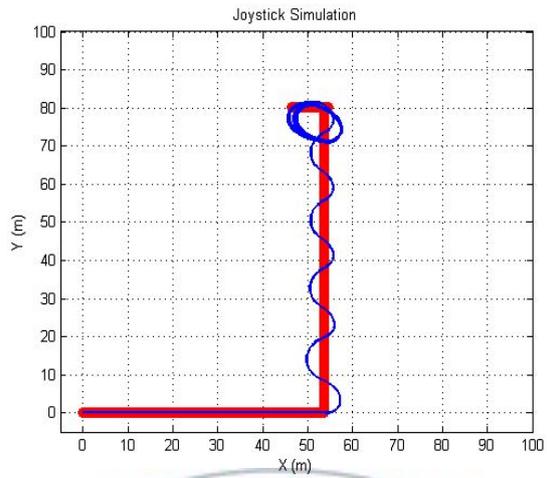


Fig. 5.3 Underactuated 특성을 고려하지 않은 시뮬레이션.

조이스틱 모드 시 AUV의 경로 생성 시 AUV의 속도를 고려하지 않고 경로를 생성 하게 되면 현재 AUV의 위치 보다 뒤에 목표 지점이 입력이 될 수가 있기 때문에 AUV가 불안한 움직임을 보이는 것으로 사료된다. 그래서 AUV의 속도와 현재 위치를 고려하여 조이스틱 궤적을 생성 하였다. 급선회 시의 문제점을 해결하기 위해 AUV의 X-Y평면 선회 운동을 시뮬레이션 수행하여 AUV의 방향타 최대각일 때 선회 반경을 확인 하였다. AUV의 방향타 최대 운동각 30° 로 하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 5.4와 같다. 방향타의 최대 각으로 운동을 하였을 때 선회 반경은 약 12m로 급선회 명령 시에는 최소 선회 반경 (Minimum Tactical Diameter : MTD)과 적용 하여 시뮬레이션을 수행 하였다. MTD는 조이스틱 모드와 웨이 포인트 모드 두 가지 모드에 대하여 동시에 수행하였다. 웨이 포인트 모드에서는 MTD를 적용 하지 않고 경로 추종을 하여야 하지만 AUV제어 알고리즘에 경로 계획 알고리즘이 탑재되어 있지 않아 MTD를 적용 하여 수행하였다.

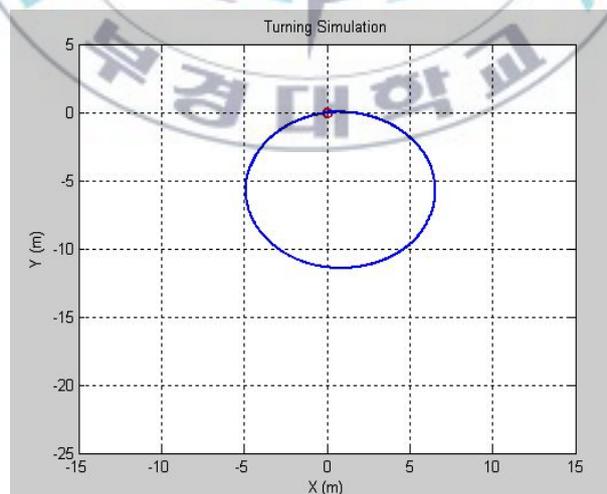
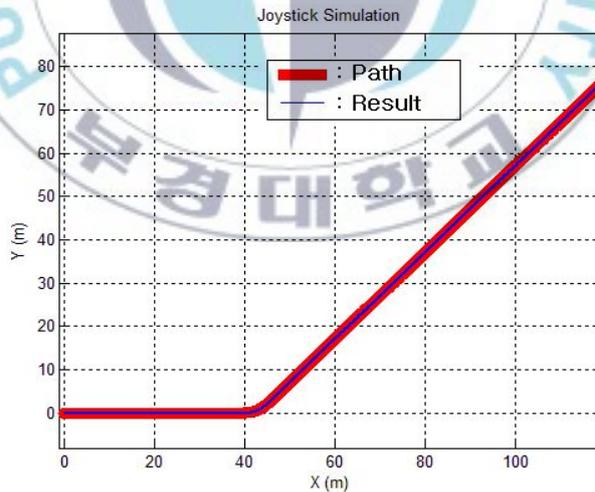


Fig. 5.4 Turning Simulation(30°).

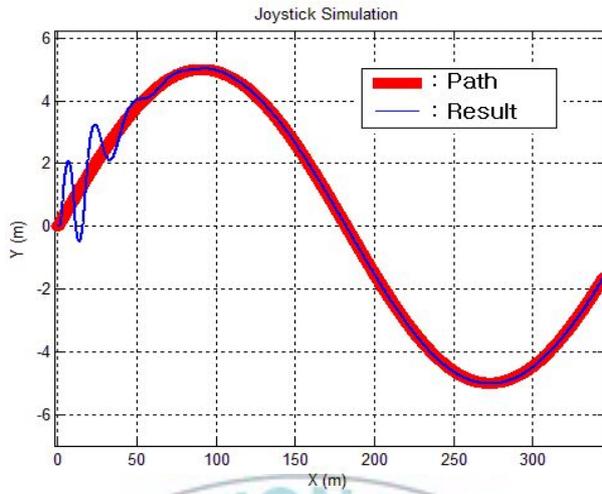
5.3 AUV시뮬레이션 결과

5.3.1 Joystick시뮬레이션

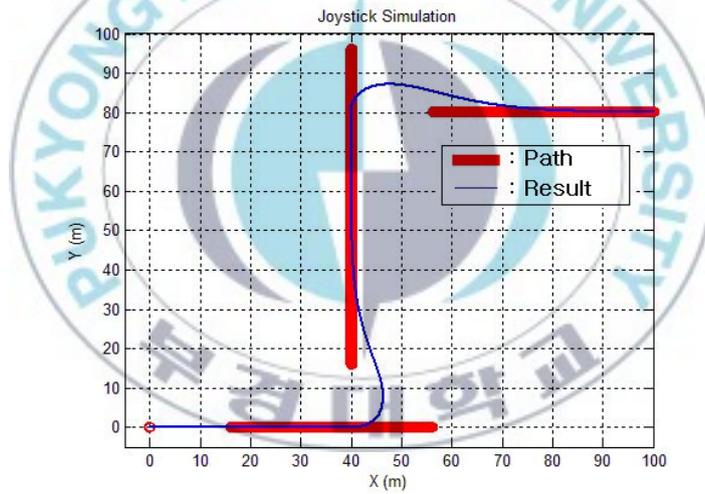
5.2장에서 분석한 제약 조건들을 적용 하여 조이스틱 모드 시뮬레이션을 수행 하였다. PD컨트롤러의 게인 값은 앞의 4장에서 구한 $k_p=-2$, $k_d=-5$ 를 적용 하여 수행하였다. 램프, 사인파 궤적과 급선회 입력에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 5.5에 도시 하였다. 대체 적으로 잘 추종하는 경향을 보이지만 사인파 입력에 대한 운동 성능이 처음에 불안한 모습은 AUV의 초기 heading 앵글이 0° 이기 때문에 초기 목표 heading 값이 커서 잘 추적을 못하지만 잠시 뒤 안정적으로 궤적을 잘 추적함을 볼 수 있다.



(a) ramp trajectory



(b) sin trajectory



(c) sudden turn

Fig. 5.5 MTD를 적용한 조이스틱 모드 경로 추적 결과

5.3.2 웨이포인트 모드 시뮬레이션

PD 컨트롤러의 게인 값은 앞의 4장에서 구한 $k_p=-2$, $k_d=-5$ 를 적용 하여 수행하였다. (0,0), (20,40), (40,40), (40,20), (20,0)와 같이 수평면에 5개의 웨이 포인트를 설정하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 5.6과 같다.

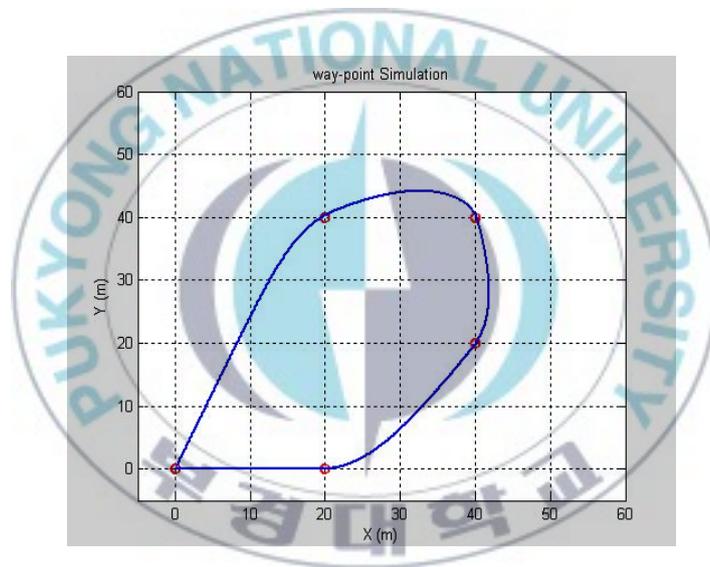


Fig. 5.6 웨이 포인트 모드 시뮬레이션 ($K_p = -2$, $K_d = -5$).

제 6장 AUV Simulator

6.1 Simulator의 필요성

AUV는 사용자가 원하는 곳으로 운동이 가능해야 성공적으로 그 임무를 수행할 수 있다. AUV동작 모드에서는 조이스틱 모드와 웨이 포인트 모드가 있다. 조이스틱 모드에서는 외부 사용자컴퓨터에 의해 RF통신으로 전송된 명령을 주제어부가 수신 받아 모터제어부와 센서처리부로 전달하고, 웨이 포인트 모드에서는 AUV의 주제어부에 탑재된 운용 알고리즘에 의해 자율 운행한다. 모터제어부에서는 주제어부의 명령에 의해 각각의 요소들에 공급되는 전원을 관리하고, 누수감지, 배터리체크의 동작을 하며, 센서처리부에서는 GPS, IMU, DVL, Depth sensor로부터 센서 데이터를 받고 고속연산을 통하여 수중 복합항법시스템을 사용할 수 있도록 구성하였다. AUV는 수중에서 사용자와 떨어져 있는 상태에서 지령을 받아 운항을 하기 때문에 그 운항에 있어서 복잡하고 많은 시스템을 탑재한 상태로 운항 되게 된다. 그러므로 AUV의 제어기의 성능 등을 간략하게 확인해 볼 수 없기 때문에 Simulator을 구성하여 제어기의 성능 등을 검증 하고자 한다.

6.2 Simulator 구성

6.2.1 실제 AUV 시스템 구성

Simulator의 구성을 설명하기에 앞서 실제 AUV의 제원에 대해서 간략하게 설명 하겠다. AUV의 외형은 Fig. 6.1과 같다.



Fig. 6.1 AUV의 외형 및 치수.

AUV의 선체는 선수부, 중앙부, 선미부의 3부분으로 크게 나눌 수 있다. 선수부의 길이 205mm, 중앙부의 길이는 1003mm, 선미부의 길이는 531mm이며, 총길이는 1739mm이다. AUV의 총 중량은 물 무게를 포함할 경우 약 37kgf이며, 컴퓨터를 이용하여 계산되어진 부력은 약 43kgf이다. 약 6kgf의 양성부력을 가지고 있다.

AUV의 전장시스템은 Fig. 6.2와 같다. AUV는 주제어부에 탑재된 운용 알고리즘에 의해 자율 운행한다. 모터제어부에서는 주제어부의 명령에 의해 각각의 요소들에 공급되는 전원을 관리하고, 누수감지, 배터리 체크의 동작을 하며, 센서처리부에서는 GPS, IMU, DVL, Depth sensor로부터 데이터를 받고 고속연산을 통하여 수중 복합항법시스템을 사용할 수 있도록 구성하였다.

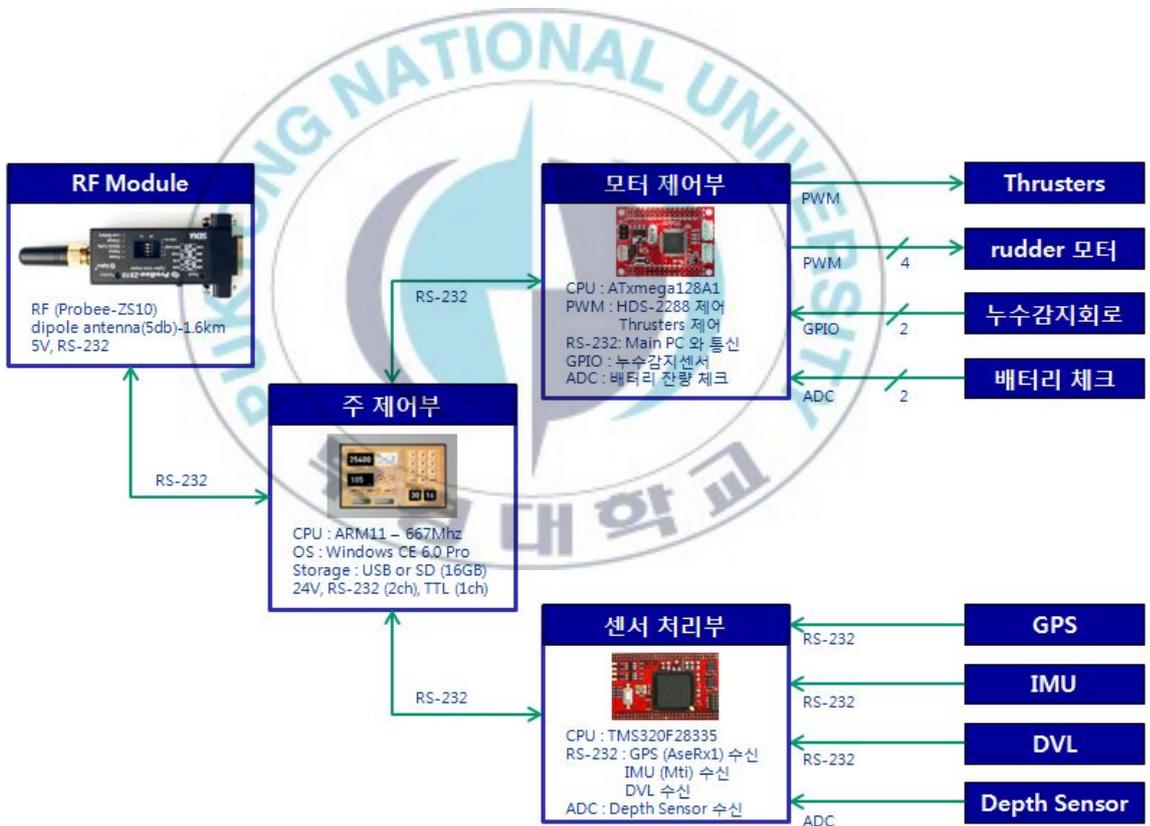
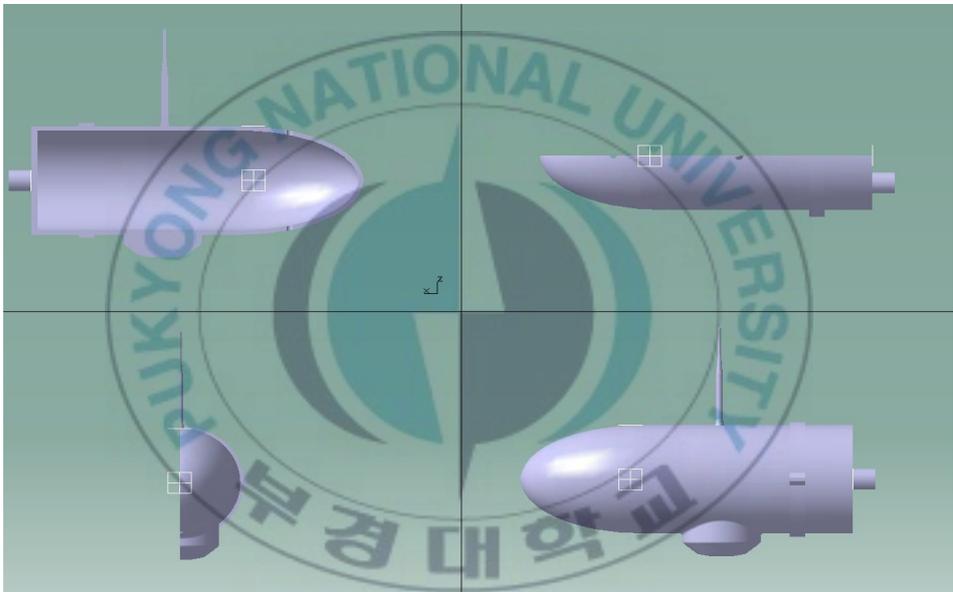
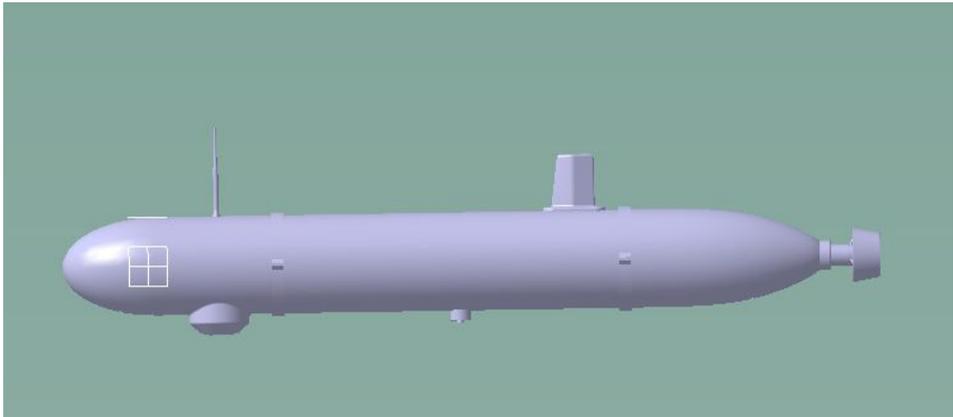


Fig. 6.2 전장시스템 구성도.

6.2.2 Simulator 시스템 구성

Simulator를 위한 AUV의 선체는 RP(쾌속조형)로 제작 하였다. RP를 이용한 제작의 크기가 한정 되어 있는 점과 Simulator를 위한 구성 품들이 들어 갈수 있는 공간을 확보하기 위하여 실제 AUV의 1/3의 스케일로 줄이고 모션구현을 위한 모터의 백래시(backlash)를 제거하기 위하여 선체를 중공으로 하고 선체 각 부분을 4등분 하여 도면을 제작 하였다.

전장 시스템은 AUV Simulator를 구성함에 있어서 러더의 움직임을 표현하는 서보 모터와 heading 모션을 구현하는 스텝모터 2개의 액추에이터를 가지고 있다. 센서는 GPS, DVL, Depth Sensor는 실내에서 Simulator구성 시에 사용에 적합하지가 않고 IMU의 경우는 CMPS03으로 대체 하여 Simulator의 heading 값을 계측하였다.



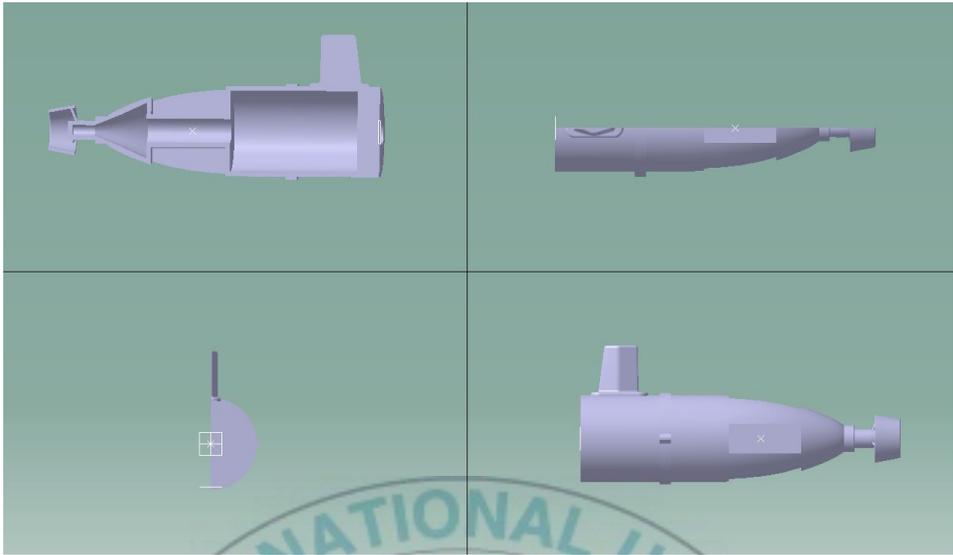


Fig. 6.3 AUV Simulator 외형 및 구성.

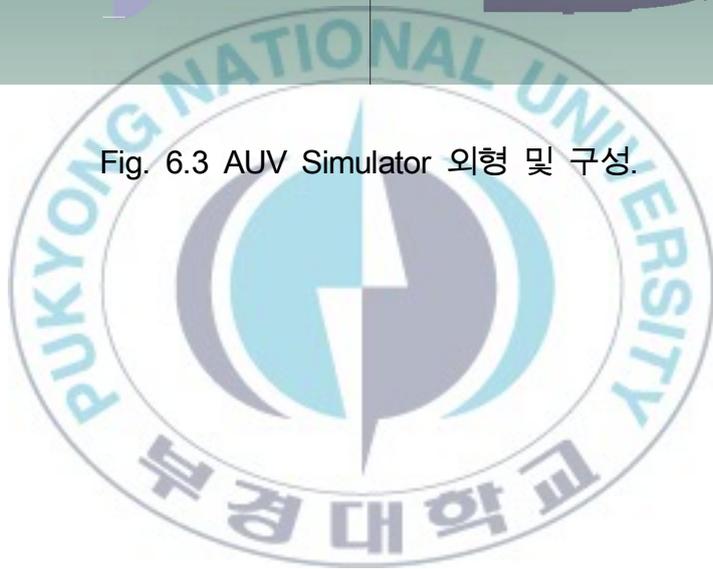




Fig. 6.4 AUV Simulator 전장 구성.

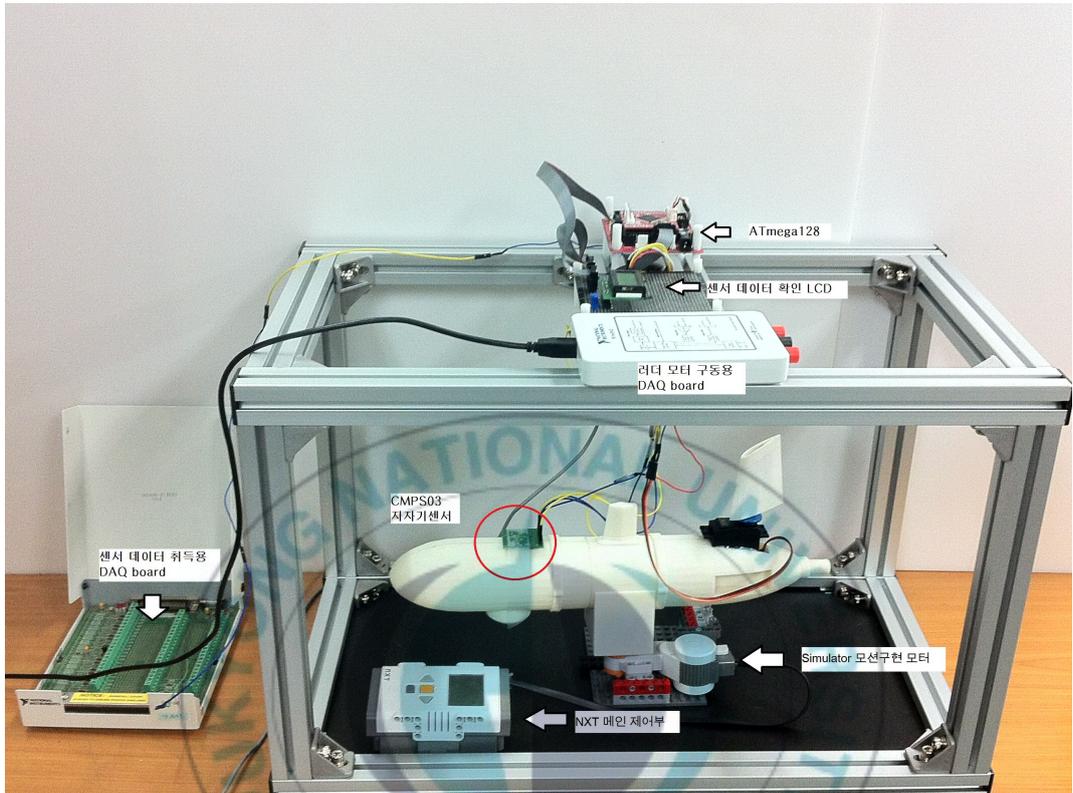


Fig. 6.5 Simulator 구성.

6.3 Simulator 알고리즘

Simulator의 주제어는 PC에서 Labview를 이용하였다. Labview는 그래픽 아이콘을 이용하며 DAQ board를 이용하여 고급 측정, 테스트 및 제어 등과 같은 시스템을 개발하기 위한 그래픽 프로그래밍 환경입니다. 그래픽 아이콘을 사용하기 때문에 접근 방식이 쉽고 제작이 용이하기에 Labview를 이용하여 주제어 프로그램을 작성 하였다.

Simulator의 알고리즘을 Fig. 6.6에 나타내었다. Labview GUI에 의해 주어진 목표 heading 값으로 러더의 값이 계산되어진다. 그에 따라 러더에 의한 AUV의 모션이 결정 되어 지고 CMPS03의 측정값이 달라진다. 센서에 의해 측정된 AUV의 heading 값을 통하여 PD제어가 이루어지게 되고 AUV의 운동 모션을 확인 할 수 있다.

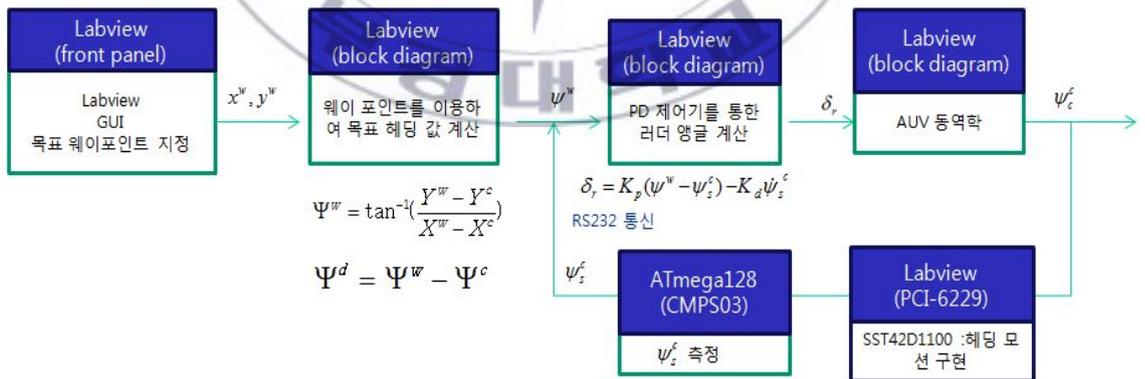


Fig.6.6 Simulator 알고리즘 블록 선도.

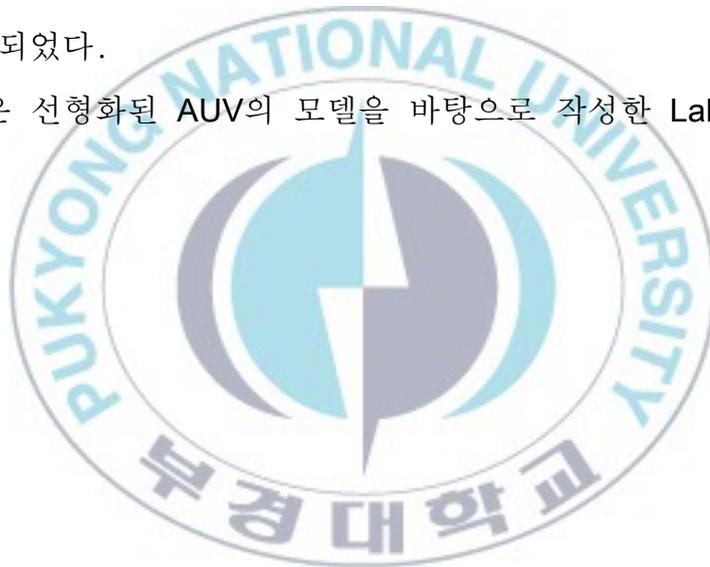
6.4 Simulator 결과

6.4.1 Simulator GUI

Labview를 이용하여 제작한 Simulator GUI(graphical user interface)를 Fig. 6.7에 나타 내었다. GUI에서는 각 상황에 맞는 시뮬레이션 및 모션의 상태를 파악하기 위한 구조로 구성 하였다.

시뮬레이션 구동 모드 별로 목표 값을 주어줄 수 있게 웨이포인트 입력 창과 목표 heading 값, 러더에 의한 모션 확인을 위한 노브 등을 추가 하여 구성 되었다.

Fig. 6.8은 선형화된 AUV의 모델을 바탕으로 작성한 Labview 코딩이다.



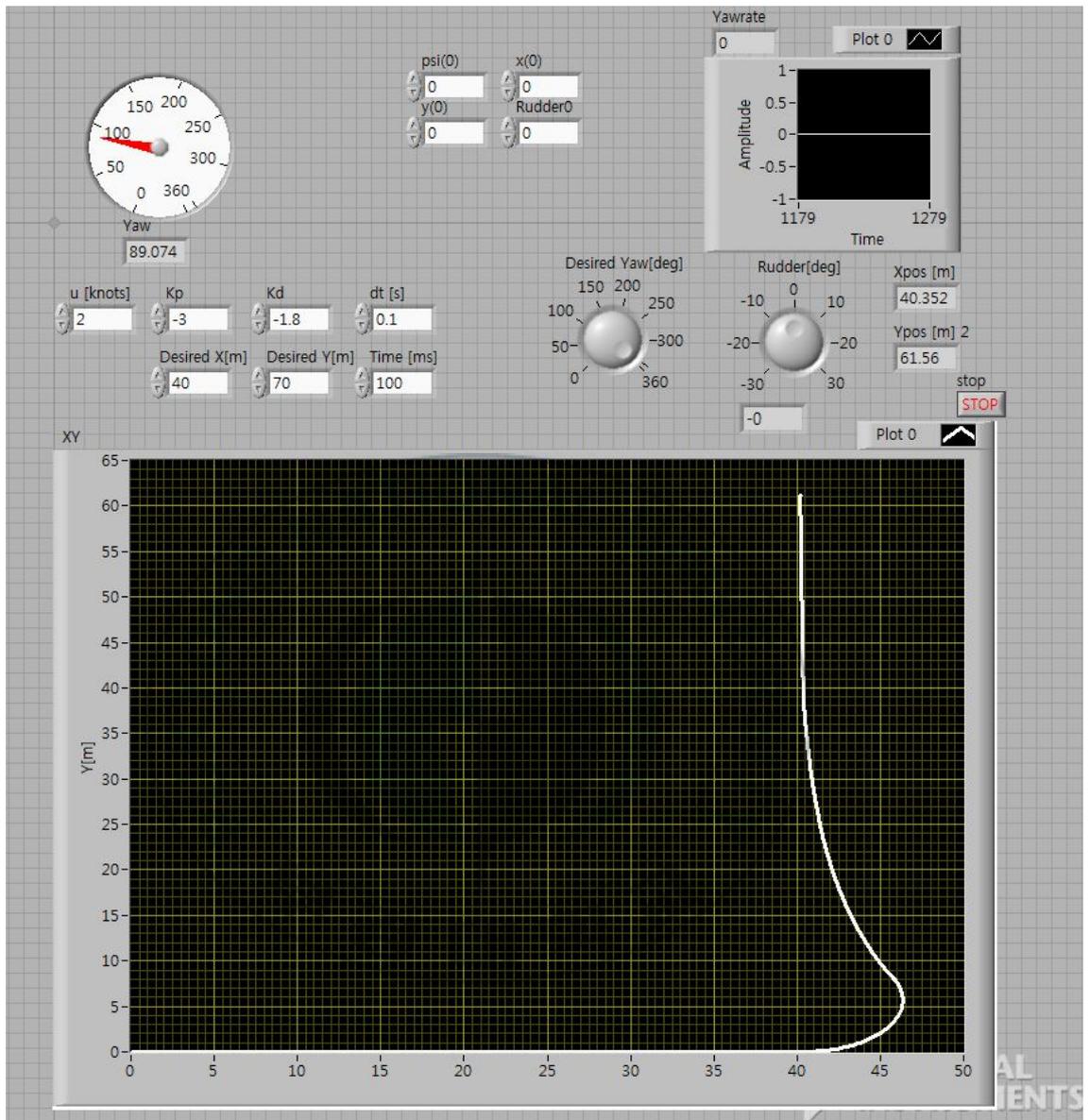
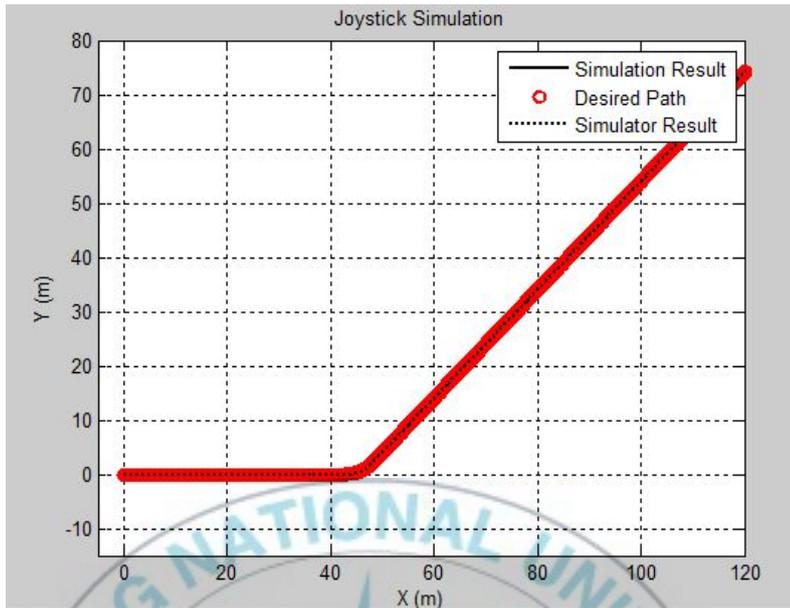


Fig. 6.7 Simulator GUI.

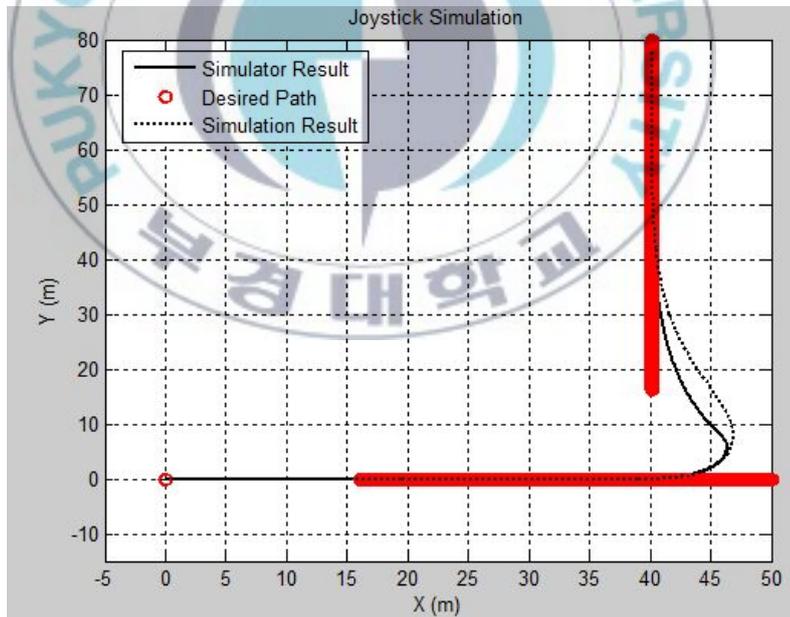
6.4.2 Simulator 실험

Labview 시뮬레이터의 결과를 Matlab을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교 하였다. 시뮬레이션은 45° 입력과 90° 입력에 대하여 비교 하였다. 두 입력 값에 대하여 시뮬레이터와 시뮬레이션 결과 모두 목표 궤적을 잘 추적 하는 것으로 보인다. 90° 입력에 대한 결과가 차이점을 보이는 이유는 시뮬레이션의 경우 수식적으로 일정하게 궤적이 입력되지만 시뮬레이터의 경우 사용자에게 의해서 인위적으로 궤적이 주어지게 되어 미세하게 차이를 나타내는 것으로 생각된다.





(a) ramp trajectory



(b) sudden turn

Fig. 6.9 시뮬레이터 실험 결과.

Simulator에 의한 결과를 Fig 6.10과 6.11에 나타내었다. 주어진 목표 heading 값에 대하여 정확하게 수렴하지는 않고 불안정한 움직임을 보이거나 전반적으로 목표 heading 값에 잘 추종하는 것으로 사료된다.

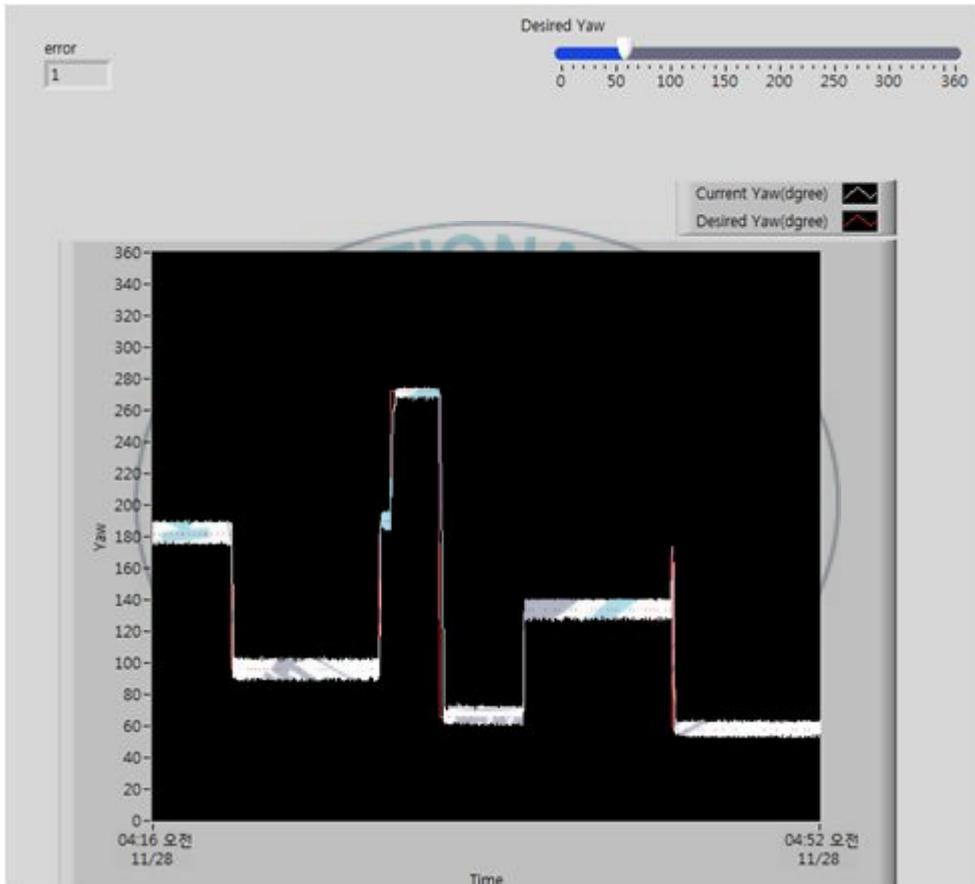


Fig. 6.10 목표 heading값에 의한 Simulator 추종 결과.

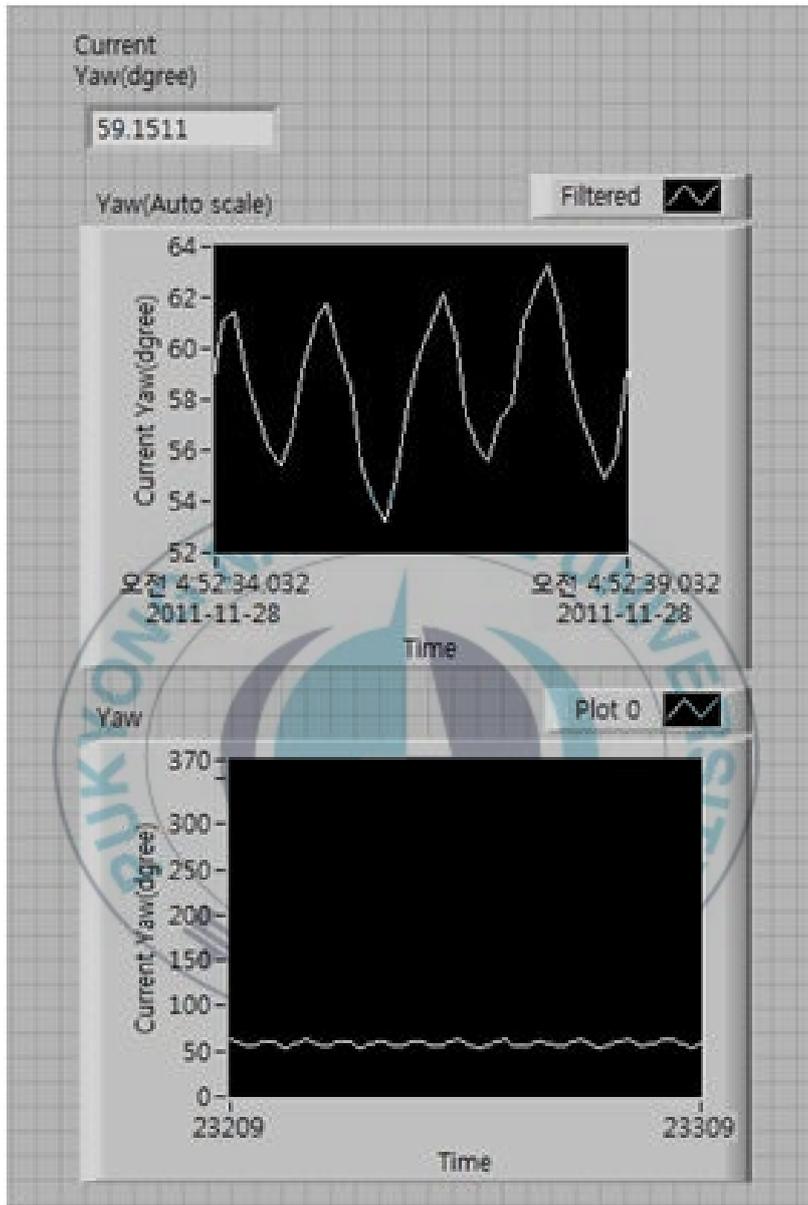


Fig. 6.11 CMPS03에 의해 측정된 Simulator heading값.

제 7장 AUV 운동성능 시험과 시뮬레이션 결과 비교

7.1 직진도 시험

수평면상에서 직진성을 시험하였다. 시험은 실내수영장에서 실시하였다. 실험시 게인 값은 $K_p=5$, $K_d=3$ 이고 속도는 약 1m/s 이다. Fig. 7.1은 시뮬레이션과 수조에서의 시험결과를 비교한 그래프이며 직진성이 좋은 것을 알 수 있다.

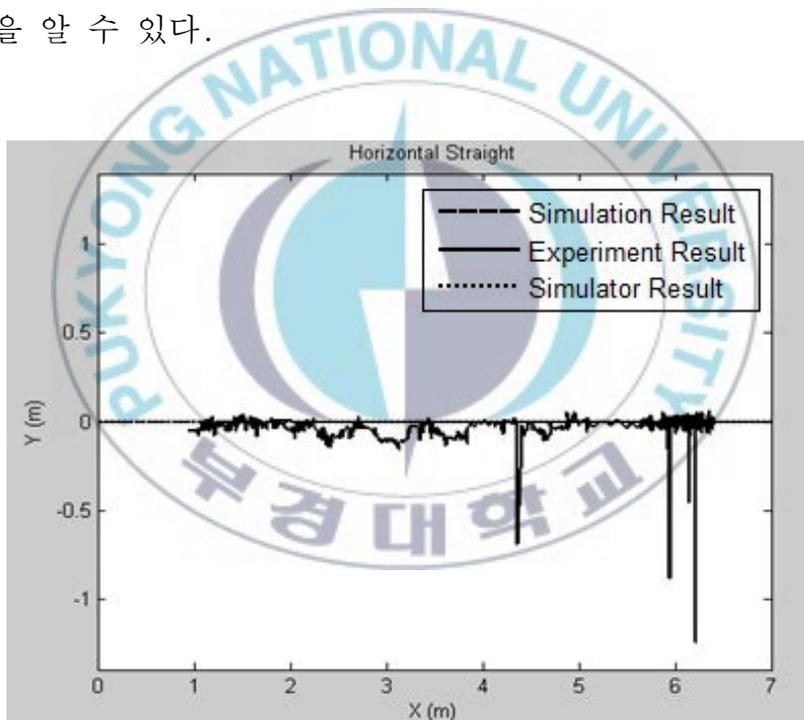


Fig. 7.1 수평면상의 직진성 시험과 시뮬레이션 결과 비교.

7.2 선회운동 시험

수평면상에서 입력은 러더 방향타의 각도로만 주고 추진하였을 때의 선회운동 시뮬레이션이다. 입력은 30° 이며 시험은 실 해역에서 실시하였다. Fig. 7.2를 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 실 해역에서 시험 시 조류가 외란으로 발생해 약간은 밀리는 현상도 원인으로 생각된다.

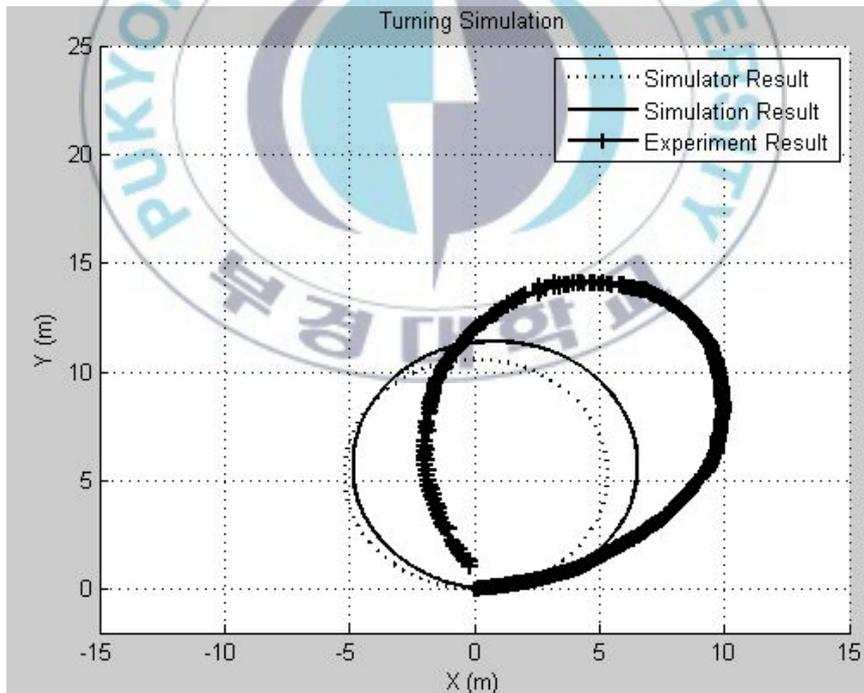


Fig. 7.2 선회운동 시험과 시뮬레이션 결과 비교.

7.3 Way-point 시험

수평면상에서 경로추적시험을 실시하였다. 웨이 포인트좌표는 $(0, 0, 0)$, $(25, 20, 0)$, $(40, 10, 0)$, $(30, 0, 0)$, $(0, 0, 0)$ 이며 실 해역에서 실시하였다. Fig. 7.3을 보면 시험 결과 조류의 영향이 있음에도 불구하고 경로는 잘 추종해가는 것을 볼 수 있다.

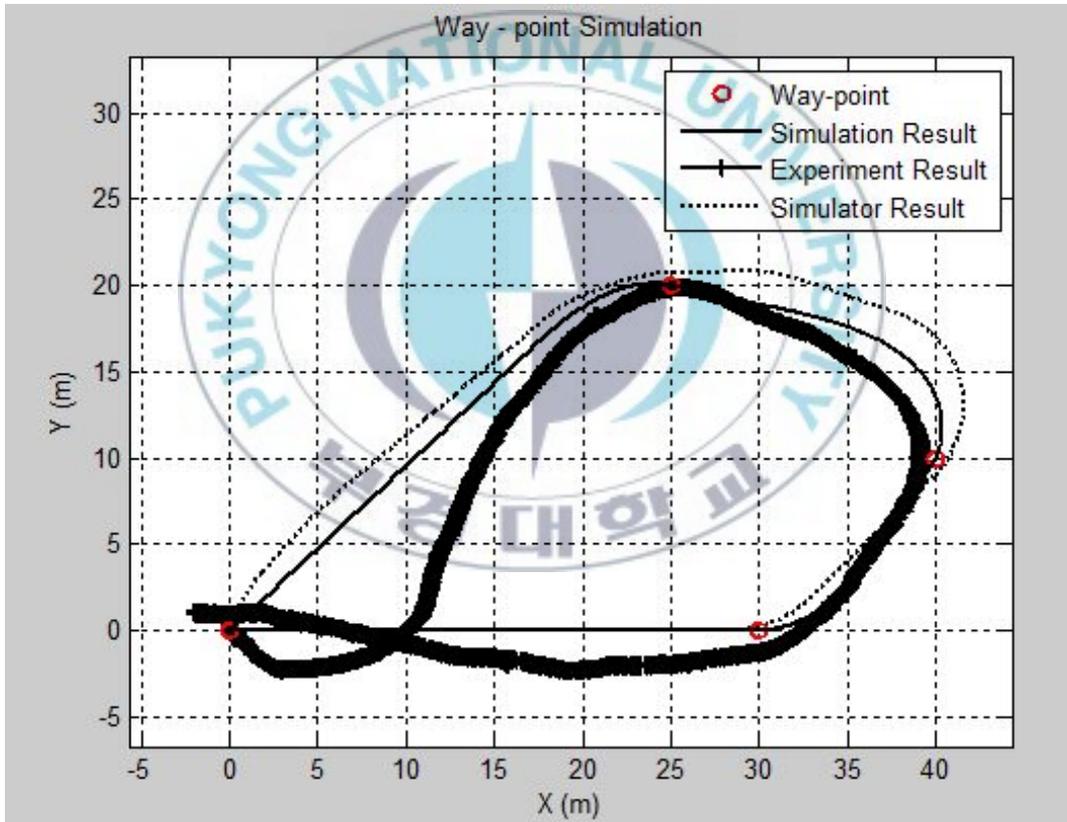


Fig. 7.3 웨이 포인트 시험과 시뮬레이션 결과 비교.

7.4 수직면 시험(깊이제어 운동)

수직면 시험은 깊이제어 운동을 시험하였다. 실내수영장에서 실시하였으며 Fig. 7.4는 수심 0.5m로 잠수향해를 계속하도록 하는 시뮬레이션과 수조에서의 시험결과를 비교한 그래프이며 일정 수심을 잘 유지하며 진행해 나가는 것을 알 수 있다.

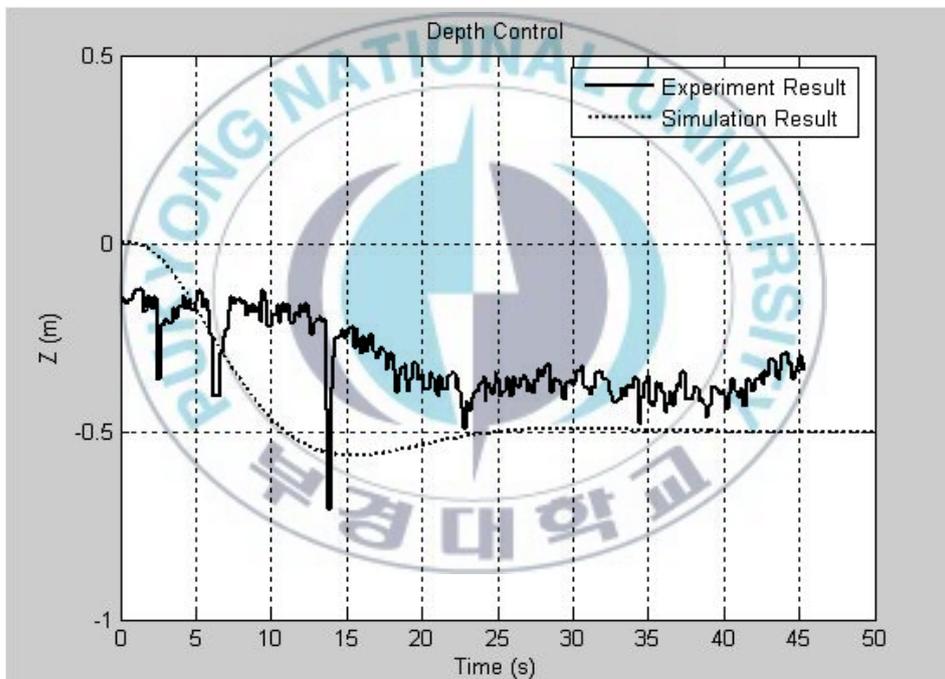


Fig. 7.4 깊이제어 시험과 시뮬레이션 결과 비교.

8. 결론

본 논문에서는 무인잠수정의 시스템을 구성해보고 무인잠수정의 운동 해석을 위하여 수학적 모델링을 선형화하여 실제 시험을 통해 시험결과와 컴퓨터 시뮬레이션 값을 비교해보았다. 자율무인잠수정의 운동을 제어하기 위해 3차원 공간상에서 선체의 비선형 요소 및 고차항에 대해서 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. 설계된 제어를 통하여 웨이 포인트 및 조이스틱 모드에 대하여 시뮬레이션을 수행 하였다. **underactuated** 특성과 **MTD**를 적용하여 경로 설정을 해주었을시에 **PD**제어기가 설정한 웨이 포인트 및 조이스틱 경로에 대하여 잘 추종해 나감을 알 수 있다. **Simulator**도 heading 컨트롤 알고리즘에 의하여 주어진 목표 heading 값에 대하여 잘 추종하였으며 **AUV**의 방향타의 방향에 따른 **AUV**의 움직임을 확인 할 수 있었다. **Remus**논문에서 나온 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 보임을 알 수 있었고 수직면 운동 및 깊이제어 시뮬레이션 및 실험결과에서 더욱 뚜렷한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 시뮬레이션과 실제 **AUV**운동성능 비교결과를 미루어 보아 향후 연구에서는 설계된 **AUV**의 선체 계수를 측정실험을 통하여 구하고 **AUV**의 전달 함수를 인용된 계수가 아닌 실제 실험에서 측정한 값들을 통하여 구하여 **CTE(Cross Track error)**나 최적경로 알고리즘을 적용 하여 외란이나 수행불가 지령에 강인한 동역학 제어를 적용 하는 연구가 진행 되어야 한다.

참고문헌

- [1] Lee, P. M.,(2007), "Development of an advanced deep-sea unmanned underwater vehicle(1)," Korea Ocean Research & Development Institute.
- [2] Jun, B. H., Lee, P. M., Lim, Y. K., (2009), "Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 5, pp. 14-22.
- [3] Yu, S. C., (2009), "Introduction to Specific Purpose AUV and Applications," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 5, pp. 33-40.
- [4] Petres, C., Pailhas, Y., Patron, P., Petillot, Y., Evans, J. and Lane, D., (2007), "path Planning for Autonomous Underwater Vehicles," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 23, No. 2, pp. 331-341.
- [5] Jantapremjit, P. and Wilson, P.A. (2008). "Autonomous Homing and Docking Tasks for an Underwater Vehicle," 2nd International Conference Underwater System Technology : Theory and Applications, November. 2008.
- [6] Kim, Y. S., (2010), "Optimal Path Planning and Path Tracking Control for Autonomous Underwater Vehicles Concerning Underactuated Characteristics ," Department of Mechatronics Engineering of the Chungnam National University.
- [7] Ma, S. J., (2007), "Design on Yaw and Depth Controllers for AUV

- and Disturbance Analysis of the Motion Responses," Department of Mechatronics Engineering of the Pukyong National University.
- [8] Lee, P. M., Hong, S. W., Lim, Y. K., Lee, C. M., Jeon, B. H. and Park, J. W., "Discrete-time Quasi-Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.24, No. 3, pp. 388-395, 1999.
- [9] Turner, R. M. and Turner, E. H., "two-level, protocol-based approach to controlling autonomous oceanographic sampling networks," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, Issue 4, pp. 654-666, 2001.
- [10] Fossen, T. I., (1999), "Guidance and Control of Ocean Vehicle," John Wiley & Sons.
- [11] Kim, K., Choi H S. (2004) "Navigation and control for a Test Bed AUV-SNUUV I", Proceeding of Underwater Technology, IEEE, pp.89 - 94
- [12] Park, J. Y., (2004), "Experiment of Attitude Control for Autonomous Underwater Vehicle," Department of Mechatronics Engineering of the Korea Institute of Science and Technology.
- [13] Lee, P. M., (2003), "Development of an Advanced Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle(2)," Korea Ocean Research & Development Institute.
- [14] Presterio, T., (2001), "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," M. S. thesis, MIT/WHOI.

- [15] Fossen, T. I., (2002), "Marine Control System," Marine Cybernetics.
- [16] Perez, T., "Ship Motion Control," Springer.
- [17] Park, J. Y., Jun, B. H., Lee, P. M., Oh, J. H., (2009). "Development of Test-Bed AUV 'ISiMi' and Underwater Experiments on Free Running and Vision Guided Docking", Underwater Vehicles, In-Teck, pp.371-398.
- [18] Chung, B. M., Seok, J. W., Cho, C. S. and Lee, J. W.,(2008), "Autonomous Tracking Control of Intelligent Vehicle using GPS Information," Journal of KSPE, Vol. 25, No. 10, pp. 58-66.
- [19] 홍승범, 지민석 "LabVIEW 기초: 따라하면서 배우는," 도서출판과학기술.
- [20] 이일영, "현대제어이론 입문"

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)

x _B	=	0.00E+00;	% Center of Buoyancy: X-dir	[m]
y _B	=	0.00E+00;	% Center of Buoyancy: Y-dir	[m]
z _B	=	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	=	5.22E+00;	% Added Mass Cross Term and Fin Lift	[kg/rad]
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	=	-5.22E+00;	% Added Mass Cross-term and Fin Lift	[kg/rad]
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	=	-2.00E+00;	% Added Mass Cross Term and Fin Lift	

[kg·m/rad]

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	= -2.00E+00;	% Added Mass Cross Term and Fin Lift	
[kg·m/rad]			
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 저의 지도 교수님이신 강인필 교수님께 깊이 감사드립니다. 본 논문이 완성될 때까지 격려와 관심을 보여주셔서 잊을 수 없는 추억들이 될 것 같습니다. 또 부족한 저를 위해 가르침을 마다하지 않으셨던 백운경 교수님과 정영석 교수님께 감사드립니다. 또한 대학원 생활동안 많은 도움을 주신 BK21사업팀 양보석 교수님 이하 참여 교수님들과 조교 선생님께 감사드립니다.

대학원 생활을 잘 적응하게 도와 주고 논문 작성과 실험에 있어서 많은 관심과 조언을 해주었던 실험실 선배 김진호 선배님 감사드립니다. 대학교 1학년때부터 지금까지 돈돈한 우정을 자랑하는 주영이, 상현이, 종철이, 학교 생활 힘들 때 너희가 많이 도움이 되어서 고맙고, 고등학교 단짝이었던 재훈이, 준현이, 다들 바쁠텐데 조언 많이 해줘서 고맙다. 기타 메카트로닉스 공학과 선·후배님들과 기계자동차 공학과 선·후배님들, 학과 사무실 조교 선생님들에게 감사한 마음을 전합니다. 부족한 저를 도와 열심히 실험실을 이끌어 준 후배 성용, 한슬용, 백규, 승우, 상현, 유비에게 고맙고 미안한 마음을 전합니다.

마지막으로 제가 하는 일이라면 항상 믿어주시는 아버지, 어머니 너무 감사하고 또 감사드립니다. 앞으로도 열심히 하는 아들이 되겠습니다. 저를 아껴주시는 모든 분들께 마지막으로 감사의 뜻을 전하며 앞으로도 말은 바 포기하지 않고 열심히 하는 사람이 되겠습니다.