

공 학 석 사 학 위 논 문

유체항력 계산을 통한
자율무인잠수정의 6자유도 모델링
및 시뮬레이션



2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스공학과

김 창 민

공 학 석 사 학 위 논 문

유체항력 계산을 통한
자율무인잠수정의 6자유도 모델링
및 시뮬레이션

지도교수 백 운 경

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함.



2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스공학과

김 창 민

김창민의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 12월 27일



주 심 공학박사 이 연 원 ①인

위 원 공학박사 주 문 갑 ①인

위 원 공학박사 백 운 경 ①인

목 차

Abstract	v
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	3
1.3 연구범위	4
2. AUV 설계	5
2.1 AUV 선체설계	5
2.2 AUV 운동시스템 설계	12
3. AUV의 동역학 모델	14
3.1 AUV의 운동좌표계	14
3.2 AUV의 6자유도 동역학 모델	17
4. AUV의 유체항력	18
4.1 Hydrostatic Force	18
4.2 Hydrodynamic Damping	20
4.3 Added Mass	36
4.4 방향타에 의한 힘과 모멘트	39
4.5 추진력에 의한 힘과 모멘트	41
4.6 외력과 모멘트	41
5. AUV 제어기 설계	42
5.1 운동방정식의 선형화	43
5.2 제어기 설계	49

5.3 운동시뮬레이션	55
6. AUV 운동성능 시험과 시뮬레이션 결과 비교	58
6.1 수평면 운동	58
6.2 Way-Point 시험	61
6.3 깊이제어 시험	62
7. 결론	63
참고문헌	65
부록	68



List of Tables and Figures

Table. 2.1	구조해석 AUV의 재원	8
Table. 3.1	AUV 6자유도 운동변수	15
Table. 4.1	CFD 해석 수행조건	23
Table. 4.2	자율무인잠수정의 Axial flow 항력 및 항력계수	27
Table. 4.3	자율무인잠수정의 Cross flow 항력 및 항력계수	32
Table. 4.4	Axial flow 항력 및 항력계수 측정값	34
Table. 4.5	Cross flow 항력 및 항력계수 측정값	34
Fig. 2.1	AUV의 외형치수	5
Fig. 2.2	AUV의 내부 및 배치	7
Fig. 2.3	수심 200m에서 선체의 구조해석	8
Fig. 2.4	AUV주변 속도장	9
Fig. 2.5	1.5m/s로 운항 시 AUV의 응력분포	10
Fig. 2.6	선미부 외형 및 추진기 체결	12
Fig. 2.7	방향타의 형상과 치수	13
Fig. 3.1	AUV의 좌표계	14
Fig. 4.1	무게중심과 부력중심의 차에 의해 발생하는 모멘트	19
Fig. 4.2	Axial 방향 AUV의 투영면적	22
Fig. 4.3	CFD 해석 모델	24
Fig. 4.4	요소격자분할 자율무인잠수정	24
Fig. 4.5	Axial flow CFD 해석영역 및 조건설정	25
Fig. 4.6	Axial flow 항력과 항력계수 모니터링	26
Fig. 4.7	Cross flow CFD 해석영역 및 조건설정	29
Fig. 4.8	AUV의 Cross flow 방향 투영면적	30
Fig. 4.9	Cross flow 항력과 항력계수 모니터링	31

Fig. 4.10 항력 및 항력계수 측정시험개념	33
Fig. 4.11 항력 및 항력계수 측정시험	33
Fig. 4.12 CFD와 시험에 의한 Axial flow 항력 값 비교	35
Fig. 4.13 CFD와 시험에 의한 Cross flow 항력 값 비교	35
Fig. 5.1 Heading Control System Block Diagram	50
Fig. 5.2 Heading Control System Step Response	50
Fig. 5.3 Depth Control System Block Diagram	53
Fig. 5.4 Depth Control System Step Response	54
Fig. 5.5 상하 방향타각에 따른 선회반경	55
Fig. 5.6 수평면 Way-point 운동성능	56
Fig. 5.7 3차원 Way-point 추적 시뮬레이션	57
Fig. 6.1 수평면상의 직진성 시험과 시뮬레이션 결과 비교	58
Fig. 6.2 선회운동 시험과 시뮬레이션 결과 비교	60
Fig. 6.3 Way-point 시험과 시뮬레이션 결과 비교	61
Fig. 6.4 깊이제어 시험과 시뮬레이션 결과 비교	62

A Study on the 6 D.O.F. Modeling and Simulation of An Autonomous Underwater Vehicle through Fluid Drag Force Calculation

Chang-Min Kim

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 motion of AUV is nonlinear because of uncertain variables. Therefore we have to define the dynamic system of components of AUV for the development of AUV to the precise attitude control.

In this thesis, the motion controller of AUV is designed by using PD controller. And hydrodynamic coefficients would be calculated based on theoretical method and CFD. For applying linear control system, nonlinear components would be linearized. A 6 D.O.F would be divided horizontal motion and vertical motion to approach simply. The dynamics model of Autonomous underwater vehicle includes hydrostatic force, hydro damping, fin force, added mass, thruster force. An AUV motion of horizontal is controlled by two rudder fin and

motion of vertical is controlled by two stern fin. The dynamic simulation of AUV is based on Matlab program which can perform the horizontal, vertical , way-point tracking motion including 3 dimension points. Simulation results and experiment results were compared in this thesis.

Keywords : AUV(Autonomous Underwater Vehicle), Drag Force, CFD(Computational Fluid Dynamics), PD Control, Way-Point Tracking



제 1 장 서론

1.1 연구배경

지상자원과 영토의 한계로 인해 해양자원에 대한 개발과 해양영토에 대한 관심이 증가하고 있다. 자율무인잠수정(이하 'AUV' 또는 '자율무인잠수정'을 혼용)의 개발은 이러한 수요에 의해서 진행되기 시작하였으며, 해양 자원개발 및 민·군 다목적 장비로서 해저지형 조사, 해저자원 탐사, 해양환경 조사 및 감시 그리고 해난 구조 등을 위한 목적으로 개발되고 있다. 기존에 해양탐사 및 자원채취 등의 목적으로 개발되어 사용되고 있는 ROV의 경우 테더 케이블 길이로 인한 작업 범위의 한계가 존재했고, 또한 케이블로 인한 항력으로 운동성과 제어효율이 떨어지는 단점을 가지고 있었다. AUV의 경우 테더 케이블 없이 자율적으로 운항하기 때문에 오퍼레이터의 능력에 따른 제어성능의 손실이 없으며, ROV에 비해 상대적으로 넓은 작전범위를 가지고 있다. 또한 탑재된 센서를 이용하여 자신의 위치를 인지하고, 내장된 경로추적 알고리즘을 이용하여 스스로 목표지점에 대한 주행경로를 설정한 후 주어진 임무를 수행하는 자율성을 지니고 있다. [1][2][3]

군사용으로는 수중에 설치되어 있는 기뢰탐색 및 작전지역의 해양지형 조사, 적 잠수함 탐지 및 추적, 다수의 AUV를 동원해 짧은 시간에 광역 탐사, 침투경로 파악 등의 용도로 개발되고 있다. 이러한

자율무인잠수정의 개발은 University of Zagreb의 Iver 사례와 같이 활발히 진행 중이다.[4]

하지만 태양열 충전지를 가지고 수면으로 부상하여 충전하는 AUV와 바다의 조류를 이용하여 최소의 에너지소모로 운용되는 일부 AUV를 제외하고는 선체내부공간의 한계로 인해 운용시간이 배터리의 용량에 제한된다는 단점을 가지고 있다. 또한 수상에서는 무선 통신을 이용해 AUV에 명령을 전송할 수 있지만, 잠항 시에는 기존의 임무를 완수하거나, 돌발 상황에 대해서 작전을 종료하고 수면 위로 떠오를 때까지 추가적인 임무부여를 할 수 없으며, 운용자가 AUV의 상태를 실시간으로 파악하지 못하고 임무수행 완료 후에 확인해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고 원활한 임무수행을 위한 AUV 운동특성의 이론적 연구가 활발히 진행되고 있다.[5][6]

설계된 AUV의 정밀한 제어를 위해서는 자율 제어에 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. 시스템 모델링에는 모델을 해석으로 구하는 방법과 측정 데이터를 이용하여 모델을 구성하는 실험적 접근 방법이 있으며, 이러한 방법을 통한 자율무인잠수정의 특성연구가 진행되고 있다.[7][8]

1.2 연구목적

본 연구에서는 자율 무인잠수정의 운용 시 운동성능에 영향을 미치는 선체특성에 대해서 명확히 정의하고 각 요소를 고려한 동역학 설계를 통해 자율무인잠수정의 시스템을 구성하여 AUV의 운동성능을 시뮬레이션과 시험을 통해 검증하는 것을 목적으로 한다. 여기서 자율무인잠수정의 동역학 모델은 유체정역학적인 힘, 양력, 항력을 포함하고 Added Mass를 포함한 계수들을 가지며 제어 입력각으로서 자율무인잠수정의 방향타 각에 의해 제어된다. 3차원을 수평면과 수직면으로 나누어 각각에 대한 PD제어기를 설계하여 3차원 공간상의 원하는 지점을 통과하는 제어계를 설계한다. 자율무인잠수정의 특성을 나타내는 계수 값과 항력은 이론적인 수식과 CFD를 이용한 2가지 방법으로 계산되어진다. 선형제어를 적용하기 위하여 비선형 계수 및 고차항 요소들은 선형화하여 적용하였으며, 선형 운동방정식을 적용하여 동역학 제어 모델을 구현한다. AUV의 운동방정식을 이용한 Matlab 시뮬레이션을 통해 AUV의 운동, 경로추정과 시험을 통한 수중 운동체의 운동성능을 비교하여 타당성을 검증한다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 운동체의 설계에 대해 기술하고 3장에서는 좌표계 설정, 운동방정식에 대해 살펴보며 4장에서는 수중 운동체의 유체항력계수에 대해 기술하고 5장에서는 수중 운동체의 제어기를 설계, 6장에서는 수중 운동체의 운동 성능 분석을 기술하며 7장에서 요약 및 결론에 대해 기술한다. [부록]에는 AUV의 유체항력 계수 값을 첨부하였다.



제 2 장 AUV 설계

2.1 AUV 선체설계

2.1.1 AUV의 외부형상 및 제원

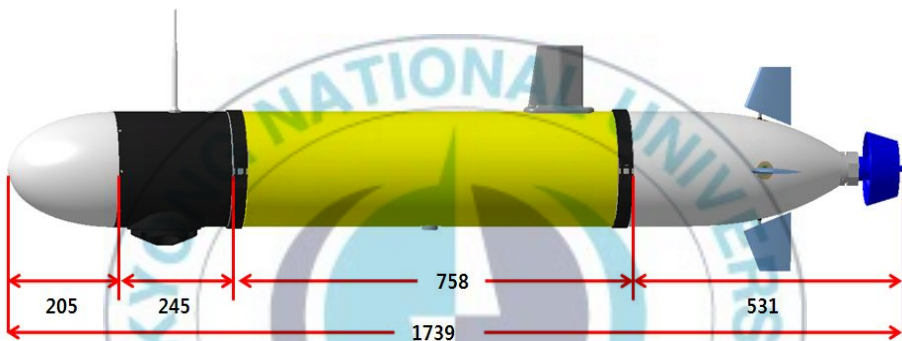


Fig. 2.1 AUV의 외형치수

2장에서는 AUV의 선체설계 및 내·외부 시스템의 구성에 대해서 다룬다. AUV의 선체는 크게 선수부, 중앙부, 선미부의 3부분으로 나뉜다. 선수부의 길이 205mm, 중앙부의 길이는 1003mm, 선미부의 길이는 531mm이며, 총길이는 1739mm이다. 외형 및 치수와 관련된 내용은 Fig. 1과 같다. AUV의 총 중량은 물 무게를 포함할 경우 약 37kg_r이며, 컴퓨터를 이용하여 계산되어진 부력은 약 44kg_r이다. 선체 내부에 납을 부착하여 약 6kg_r의 양성부력 0.8kg_r으로 줄였다. 양성부력이 너무 클 경우에 잠수성능을 저하시킬 수 있기 때문에 양성부력에 가깝게 무게를 조절하였다. 선체는 Al6061으로 제작되었

으며, 선수부는 Engineering Plastic 중에서 PC (Poly Carbonate)를 선택하여 제작하였다. 선체의 형상은 선수부와 선미부에 Myring Profile을 적용하였고, 선체의 중앙부의 외경은 $\phi 200$ 으로 설계하였다. 선수부와 선미부에 적용된 형상은 각각 식(2.1)과 식(2.2)와 같다.

$$r_{head}(x) = \frac{1}{2} \times d \times \left(1 - \left(\frac{x-a}{a}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$r(x) = \frac{1}{2} \times d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan(\theta)}{c} \right] (x - (a+b+c))^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\tan(\theta)}{c^2} \right] (x - (a+b+44.77))^3 \quad (2.2)$$

여기서, x 는 선체의 길이 방향 독립변수, a 는 선수부 길이, d 는 선체직경, b 는 중앙부 길이, c 는 선미부 길이 그리고 θ 는 Myring Profile의 형상과 관련된 각이다. 선체의 외부로 RF안테나, DVL, GPS안테나, 충전커넥터가 장착되어있다. AUV의 운동은 1개의 추진기와 4개의 방향타에 의해서 이루어지며, 방향타는 미국 익형의 표준규격인 NACA0012를 적용하여 설계하였다.

2.1.2 AUV의 내부

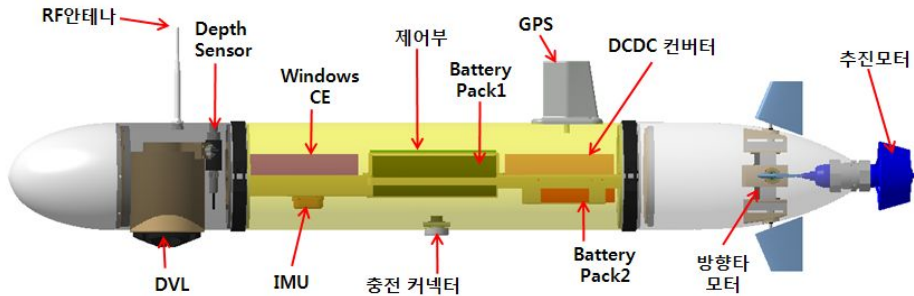


Fig. 2.2 AUV의 내부 및 배치

AUV의 내부와 탑재장비의 배치는 Fig. 2.2와 같다. 탑재장비의 위치에 따라서 무게중심과 공간 활용도가 달라지기 때문에 이를 고려하여 배치하였다. 선체 내부에는 선수부와 중앙부, 중앙부와 선미부 사이에는 Partition Plate가 존재하여 누수가 발생하였을 때, 각 파트별로 방수가 가능하도록 하였다. 전장부의 배선과 센서장비가 노이즈에 노출되는 정도를 고려하여 무게중심이 선체의 중앙에 올수 있도록 좌우대칭으로 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. 선체 내부에는 2개의 배터리가 탑재되며, 각각 추진기와 전장부 전력공급에 사용된다.

2.1.3 AUV의 구조해석

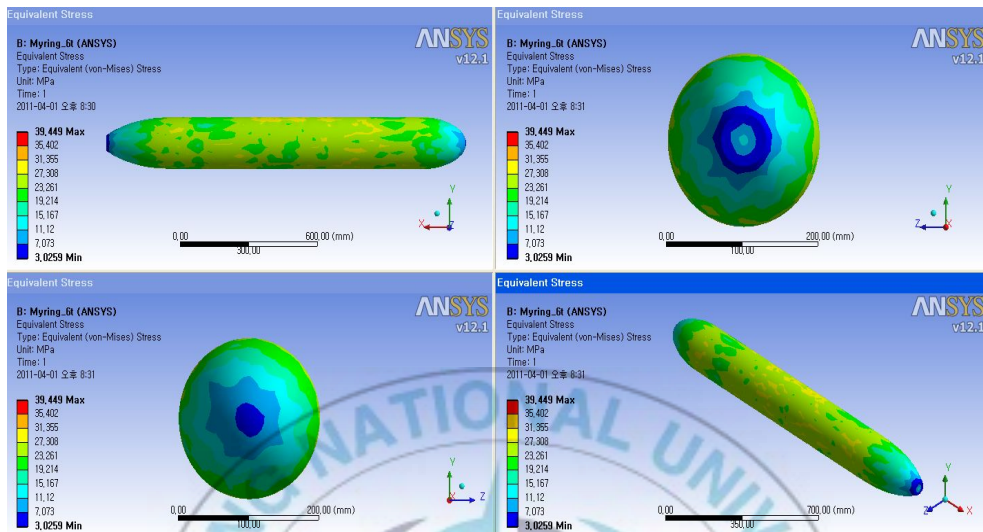


Fig. 2.3 수심 200m에서 선체의 구조해석

Fig. 2.3은 AUV의 운용수심이 200m일 때, 작용하는 압력 2Mpa를 기준으로 AUV에 대해서 구조해석을 수행한 결과이다. 설계된 선체에 대해서 충분한 강도를 가지는지 확인하기 위해 수행된 해석이므로, 형상을 간략화 하였다. 대상이 되는 AUV의 제원은 Table. 2.1과 같다.

Table. 2.1 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 선체구조로 판단된다.

2.1.4 AUV의 CFD 해석

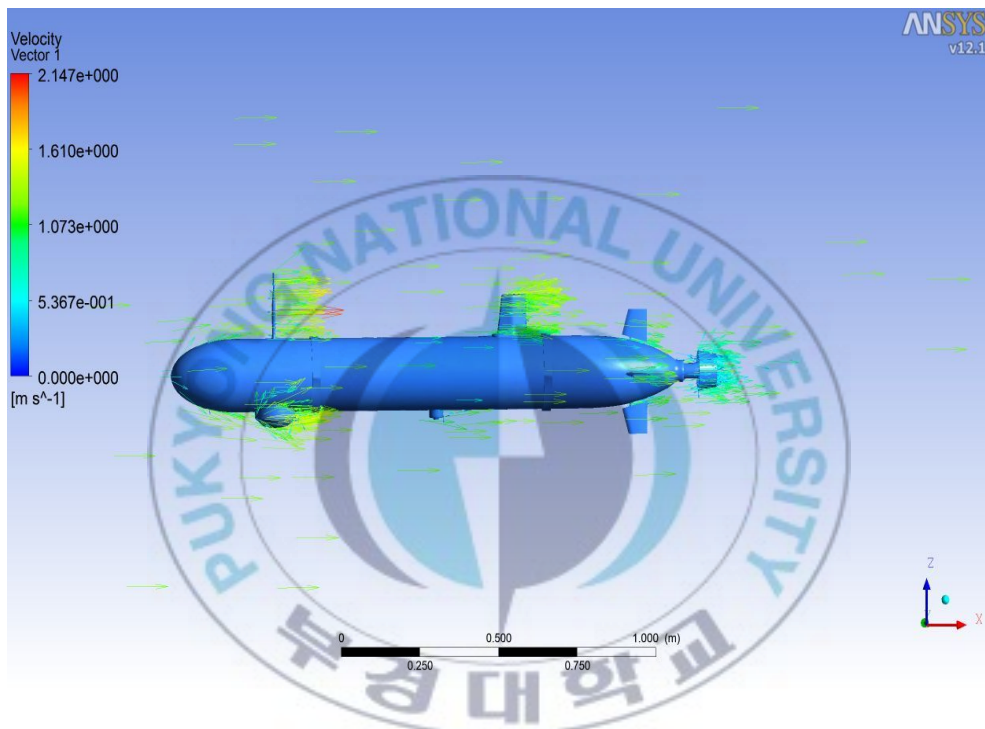


Fig. 2.4 AUV주변 속도장

AUV의 형상에 따라 선체주변의 유동특성이 달라진다. 선체주변의 정확한 유체흐름을 알기 위해 유동해석에서의 모델은 실제 AUV의 형상을 그대로 적용하여 수행하였다. 선수부와 선미부는 모두 Myring Profile을 따라 설계되었으며, CFD해석을 통한 선체 주변의 유동은 Fig. 2.4와 같다. 선수부와 선미부의 경우에는 형상이 유선형이기 때문에 비교적 안정적인유동을 보이고 있지만 Hull을 제외한

외부 돌출부에서 유동의 분산이 발생함을 알 수 있다. 특히 RF안테나의 경우 강도가 크지 않기 때문에, AUV의 운항에 따라 발생하는 압력분포를 고려하였다. Fig. 2.5는 AUV의 운항속도가 약 1.5m/s 일 때, 선체에 작용하는 압력분포를 나타낸다. 최대 운용수심에서 속도에 의한 압력분포를 확인하기 위해 200m에서의 압력 2Mpa를 기준으로 해석을 수행하였다.

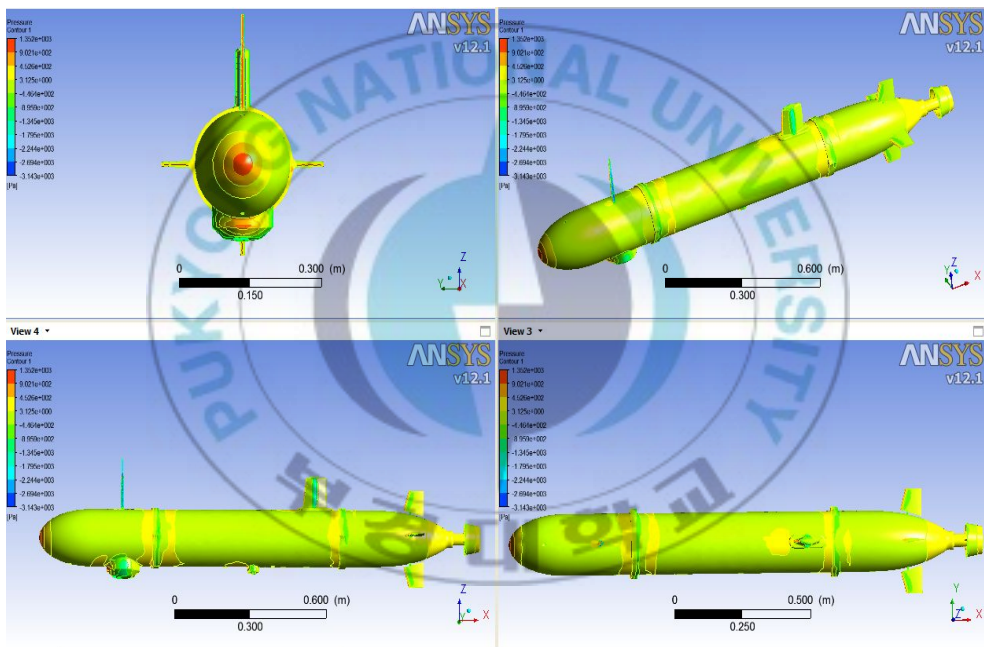


Fig. 2.5 1.5m/s로 운항 시 AUV의 응력분포

Fig. 2.5는 1.5m/s로 운항 시 AUV에 발생하는 압력이 분포를 나타내며, 기준압력 2Mpa를 제외한 압력을 결과이다. 이때 가장 큰 응력의 크기는 1352.11Pa이다. 본 연구의 해석대상인 AUV는 200m의 수심에서 운용 가능하도록 설계되었기 때문에, 최대운용 수심에

서 발생하는 응력의 크기가 1.5m/s로 운항 시 발생하는 최대응력보다 상대적으로 매우 큰 값을 알 수 있다. 따라서 본 연구범위 내에서 속도에 의한 영향은 선체의 운동성능을 결정짓는 중요한 요소로 작용하지만 선체의 강도설계에는 큰 영향요소가 되지 못함을 알 수 있다.



2.2 AUV 운동 시스템 설계

2.2.1 추진기 설계

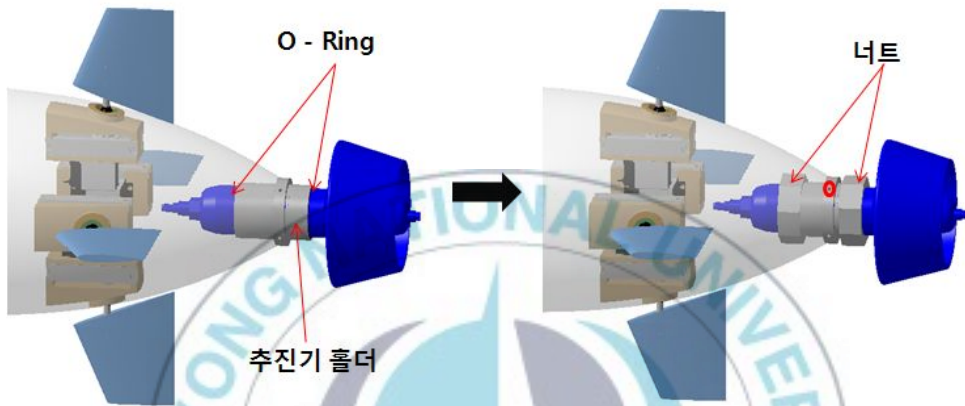


Fig. 2.6 선미부 외형 및 추진기 체결

추진기는 선미부에 Fig. 2.6과 같이 결합되어있다. AUV의 추진력과 관련된 추진모터는 선미의 끝부분에 장착되어 있으며, 방수를 위해 추진기 홀더 양 끝에 O-ring을 삽입한 너트로 고정하였다. 추진기의 RPM에 따라 선체의 운용속도가 달라지며, 방향전환 및 잠수는 방향타에 의해 이루어진다. 본 AUV에 적용된 추진기는 Model 300이며, 설계가 연구목적이 아니므로 자세한 추진기 설명은 생략한다.

2.2.2 방향타 설계

AUV의 방향타는 선체의 잠수 및 수평운동이 가능할 수 있도록, 수치적 계산에 의해서 설계되었다. 방향타의 형상은 미국 익형 규격인 NACA0012를 적용하였으며, 치수와 관련된 그림은 Fig. 2.7과 같다.

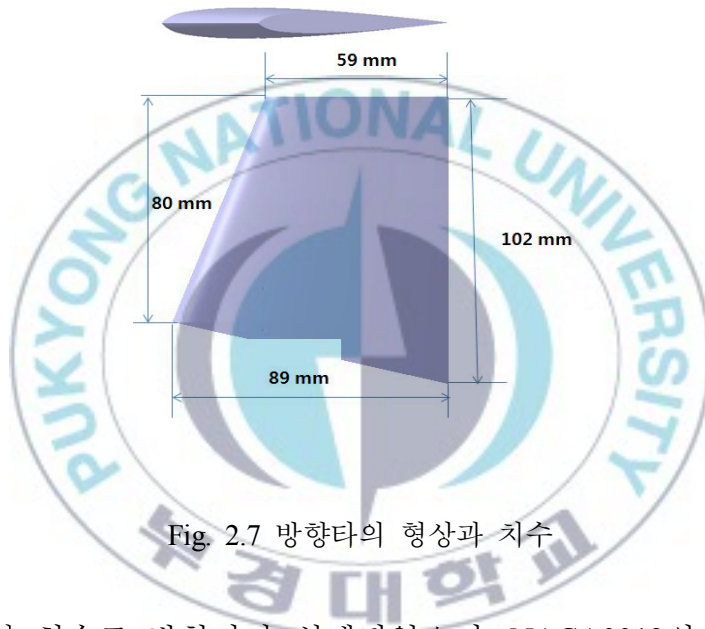


Fig. 2.7 방향타의 형상과 치수

Fig. 2.7의 치수로 방향타가 설계되었으며, NACA0012의 형상과 관련된 식은 식 (2.3)과 같다.

$$y = \frac{t}{0.2}c \left[0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.126 \left(\frac{x}{c} \right) - 0.3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right] \quad (2.3)$$

여기서, c 는 총 가로길이, t 는 최대두께, x 는 선체 길이방향 독립변수

제 3장 AUV의 동역학 모델

3.1 AUV의 운동좌표계

6자유도를 가지는 자율무인잠수정의 위치와 자세를 나타내기 위해서 전역 좌표계(Global coordinate system)와 물체 고정 좌표계(Body fixed coordinate system)를 정의하여야 한다. 전역 좌표계의 원점은 자율무인잠수정이 출발하는 해수면 상의 한 지점을 기준으로 하여 해수면에 투영되는 AUV의 출발 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 무게중심과 일치한다. 좌표계는 Fig. 3.1과 같이 정의한다.

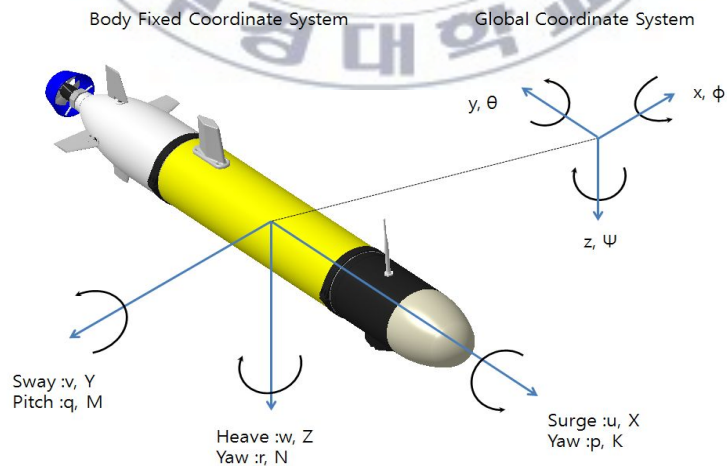


Fig. 3.1 AUV의 좌표계

6자유도를 나타내기 위한 변수는 Table. 3.1과 같다.

Table. 3.1 AUV 6자유도 운동변수[10]

DOF		forces and moments	Linear and angular velocity	Position and Euler angles
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
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. 3.1과 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.[9]

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_1)v_1 \quad (3.1)$$

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

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

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

기준 좌표계와 물체 고정 좌표계를 설정하게 되면 기준 좌표계에 대해 선체의 물체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 식(3.3)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(3.4)에서 오일러 각의 경우 자율무인잠수정의 피치 각이 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.

3.2 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-z평면과 x-y평면에 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]에 나타내었다. 관성곱을 무시한 6자유도 운동 방정식은 식(3.5)와 같다.[9]

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

식(3.5)에서 우측의 항들은 자율무인잠수정에 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.

제 4장 AUV의 유체항력

4.1 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 coordinate이므로 좌표변환 행렬 식(3.3)을 이용하여 식(4.1)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.[11]

$$f_G(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad f_B(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

유체정역학적 힘과 모멘트는 식 (4.2)로 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{HS} &= f_G - f_B \\ M_{HS} &= r_G \times f_G - r_B \times f_B \end{aligned} \quad (4.2)$$

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

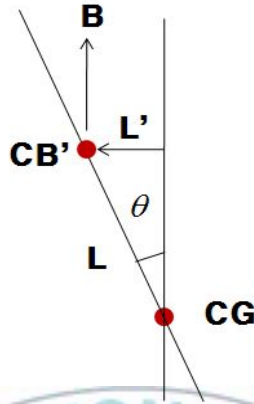


Fig. 4.1 무게중심과 부력중심의 차에 의해 발생하는 모멘트

Fig. 4.1과 같이 무게중심과 부력중심의 차이로 인해 발생하는 모멘트가 선체의 피치와 롤에 대해서 유체정역학적 안정성과 관련된다. 좌표변환행렬 (3.3)의 역변환을 식(4.1)에 대입하면 식(4.3)과 같다.

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

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

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

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

$$M_{HS} = -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi \quad (4.3)$$

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

4.2 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. 항력은 hydrodynamic damping으로 나타낼 수가 있는데 아래와 같은 요소로 이루어진다.[11]

$$D(v) = D_P(v) + D_S(v) + D_W(v) + D_M(v) \quad (4.4)$$

$D_P(v)$ = 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

항력의 크기 F_d 는 유체에 대한 상대 속력을 $v(\text{m/s})$, 유체의 밀도를 $\rho(\text{Kg/m}^3)$, 물체의 단면적을 $A(\text{m}^2)$ 라고 할 때, 항력은 식(4.5)와 같이 구성된다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \quad (4.5)$$

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 상수이다. 항력모델을 단순화하기 위해 1차와 2차만의 행렬로 나타내면 식(4.6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \\ K_D \\ M_D \\ N_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} X_{u|u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v} & 0 & 0 & 0 & Y_{r|r} \\ 0 & 0 & Z_{w|w} & 0 & Z_{q|q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{p|p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{w|w} & 0 & M_{q|q} & 0 \\ 0 & N_{v|v} & 0 & 0 & 0 & N_{r|r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u \\ v|v \\ w|w \\ p|p \\ q|q \\ r|r \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Axial drag는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 또는 회류수조를 이용한 항력테스트를 통해서 구할 수 있다.

4.2.1 Axial flow drag

Axial drag는 AUV의 진행방향에 대해서 유체에 의해 발생하는 선체의 저항을 의미한다. 식 (4.7)과 식(4.8)은 각각 축 방향에 대한 Axial drag와 비선형 Axial drag coefficient를 의미한다.[12]

$$X = -\left(\frac{1}{2}\rho c_d A_f\right)u|u| \quad (4.7)$$

$$X_{u|u|} = -\frac{1}{2}\rho c_d A_f \quad (4.8)$$

여기서, ρ 는 선체주변 유체의 밀도, A_f 는 전진방향에 대한 선체의 투영면적, c_d 는 전진방향에 대한 선체의 항력계수, u 는 Body-fixed coordinate에서 x축 방향에 대한 속도이다. AUV의 항력계수를 구하기 위해서는 Axial 방향의 투영면적을 정의해야한다. Fig. 4.2는 Axial 방향 AUV의 투영면적이다.

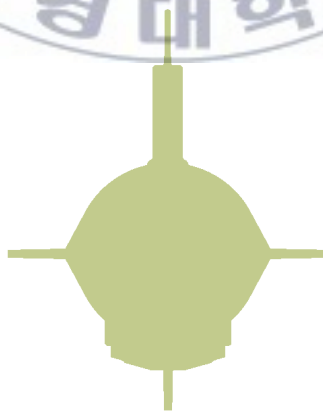


Fig. 4.2 Axial 방향 AUV의 투영면적

Catia에 의해 계산되어진 AUV의 Axial 방향 투영면적은 0.045m^2 이다. 이 결과 값을 이용해 항력계수 값을 계산할 수 있다.

자율무인잠수정에 발생하는 Axial drag값을 시뮬레이션으로 구하기 위해 ANSYS-CFX ver. 12.0을 사용한다.[13] CFD 해석 수행조건은 Table. 4.1과 같다.

Table. 4.1 CFD 해석 수행조건

Mesh	No. of nodes	441,170	
	No. of Elements	No. of Prisms	366,211
		No. of Pyramids	1,981
		No. of Tetrahedra	1,421,243
Temperature	15 ($^{\circ}\text{C}$)		
Density	997 (kg/m^3)		
Turbulence model	Shear Stress Transport (SST)		
Reference pressure	1 (atm)		

해석에 사용된 모델은 세분화된 구조물 결합체에서 소수의 단일체로 구성품을 최소화하여 해석을 수행하였다. 복잡한 구조물일 경우 구조물간에 예상치 못한 간섭이나, 격자형성시에 구조물간의 결합 부위에서의 격자형성이 원활히 이루어지 않을 수 있기 때문에, 해석의 편의성과 영향을 크게 미치지 않는 불필요한 부분을 단순화하여 해석수행 시간을 줄이는데 목적을 두고 있다. 이와 관련하여 해석에 수행된 모델은 Fig. 4.3과 같다.

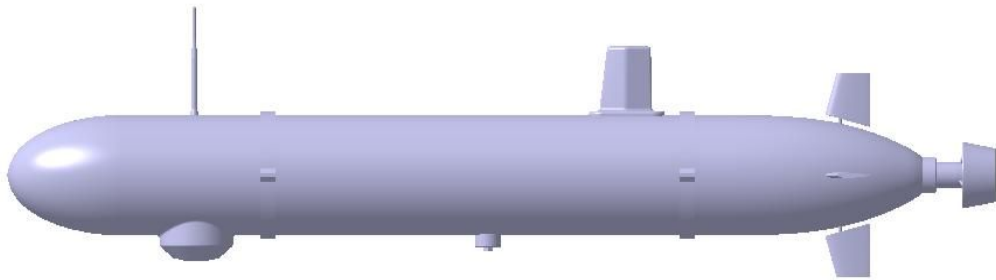


Fig. 4.3 CFD 해석 모델

CFD해석을 수행하기에 앞서 요소격자분할작업이 필요하다. 유체 영역에서 복잡한 구조물의 형상을 해석하는데 적합한 격자로 Tetrahedral요소와 Pyramid요소를 사용하였으며, 선체와 유체사이의 경계층을 표현하기 위해서 Prism요소를 사용하였다.[14] 요소격자분할은 Fig. 4.4과 같다.

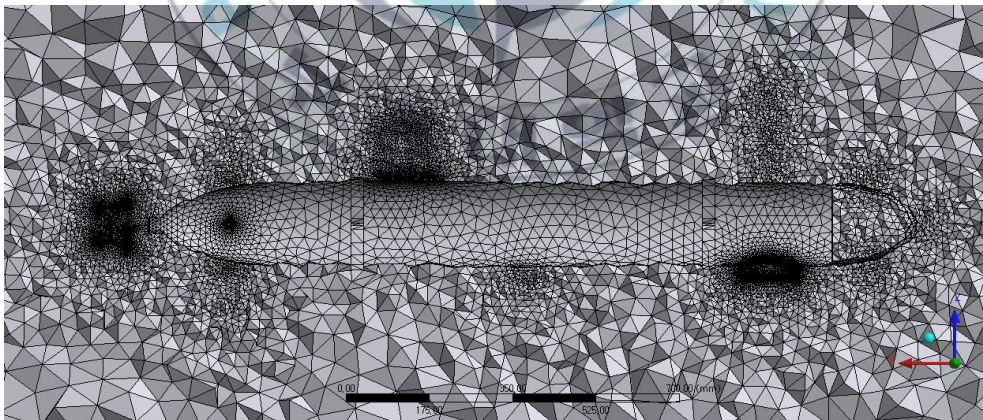


Fig. 4.4 요소격자분할 자율무인잠수정

유동해석을 위해 선체를 감싸는 유체영역을 정의해야 하는데, 이

러한 유체영역은 선체 주위의 유동에 영향을 미치지 않을 정도로 크게 설정하여야한다.[15] 하지만 필요이상으로 크게 설정할 경우 해석시간만 증가시키고, 해석에는 별다른 영향을 미치지 않으므로 경험을 통해 적당한 크기의 유체영역을 설정해야한다. 유체영역의 크기는 Fig. 4.5의 좌표축을 기준으로 x축 방향으로 -1.5m ~ 1.5m, y축과 z축 방향으로 -0.5m ~ 0.5m로 결정하였다. x축 방향으로 선체 길이의 약 2배 정도이며, y축과 z축 방향으로는 약 5배 정도 크게 유체영역을 설정하였다. 자율무인잠수정의 해석모델은 레이놀즈수에 의해 층류와 난류로 구분되어진다. 레이놀즈수를 고려하여 ANSYS-CFX에서 권장하는 SST (Shear Stress Transport)모델을 사용하여 비선형적인 유동을 해석하였다. 해석과 영역의 정의 및 조건과 관련된 내용은 Fig. 4.5와 같다.

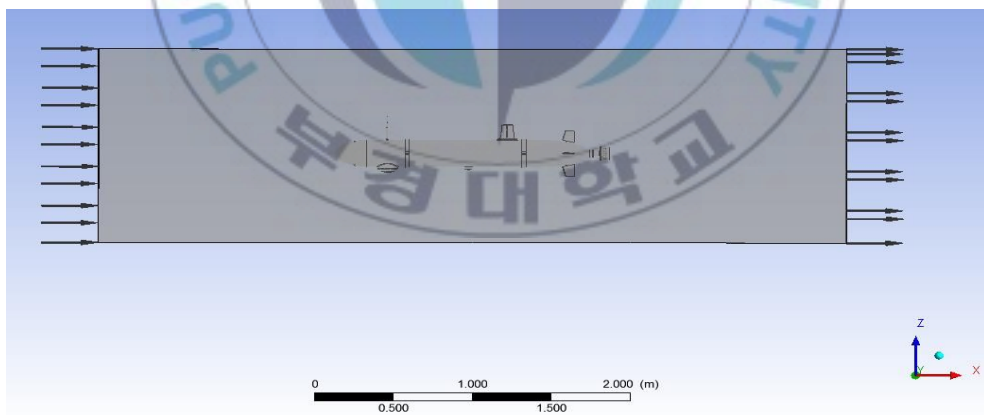


Fig. 4.5 Axial flow CFD 해석영역 및 조건설정

ANSYS-CFX의 경우 반복 해석 수행과정 중에 원하는 결과 값에

대해서 모니터링이 가능하다. Output Control에서 모니터링 기능을 이용하여 자율무인잠수정에 발생하는 항력의 크기와 항력계수를 그래프를 통해 알 수 있으며, 원하는 결과 값이 수렴하는 구간을 파악하여 불필요한 해석시간을 줄일 수도 있다. 이와 관련된 내용은 Fig. 4.6과 같다.

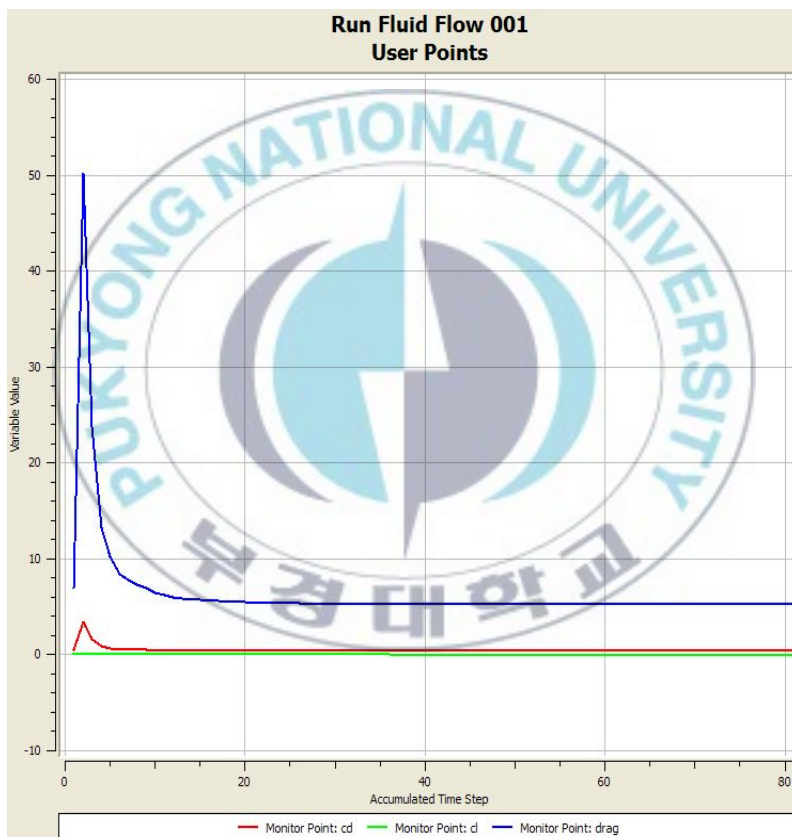


Fig. 4.6 Axial flow 항력과 항력계수 모니터링

약 27번의 Iteration을 통해서 항력과 항력계수의 결과 값이 수렴하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.6의 경우 0.8m/s의 속도로 자율무인잠수

정의 X축 길이방향으로 유체를 흘렸을 때 발생하는 결과 값을 나타내고 있다. 유사한 방법으로 1.0m/s, 1.2m/s, 1.4m/s, 1.6m/s에서의 해석을 통해서 선체에 발생하는 항력과 항력계수 값을 구하였다. 이와 관련된 내용은 Table. 4.2와 같다.

Table. 4.2 자율무인잠수정의 Axial flow 항력 및 항력계수

Velocity (m/s)	Reynolds No.	Axial Drag Force (N)	Axial Drag Coefficient
0.8 (m/s)	1.876E+06	5.2095 (N)	0.363
1.0 (m/s)	2.345E+06	8.0945 (N)	0.361
1.2 (m/s)	2.814E+06	11.348 (N)	0.351
1.4 (m/s)	3.283E+06	15.272 (N)	0.347
1.6 (m/s)	3.752E+06	19.649 (N)	0.342
Average			0.353

Table. 4.2와 같이 속도가 증가함에 따라 항력 값이 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. CFD해석을 이용해 구한 Axial Drag Coefficient는 0.353이다. 요소의 크기와 수를 달리하여 반복해석을 수행하였으며, Table. 4.2의 결과 값은 해석수행시간과 해석컴퓨터의 성능을 고려하여 요소의 수를 증가시켜도 결과 값이 크게 달라지지 않는 범위 내에서 계산되어진 값이다. 회류수조를 이용한 시험 값과 비교하여 CFD해석의 신뢰성을 검증하였다.

4.2.2 Crossflow drag

cross flow drag는 선체의 측면에 대한 항력을 의미한다. 비선형 항력계수는 식 (4.9)와 같이 표현되어진다.[12]

$$\begin{aligned}
 Y_{v|v} &= Z_{w|w} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x)dx - 2\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin}c_{df}\right) \\
 M_{w|w} &= -N_{v|v} = \frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2xR(x)dx - 2x_{fin}\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin}c_{df}\right) \\
 Y_{r|r} &= -Z_{q|q} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x|x|R(x)dx - 2x_{fin}|x_{fin}|\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin}c_{df}\right) \\
 M_{q|q} &= N_{r|r} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x^3R(x)dx - 2x_{fin}^3\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin}c_{df}\right) \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

이때, C_{dc} 는 실린더형상에 대한 항력계수, $R(x)$ 는 선체의 x 축 방향을 독립변수로 취하는 선체의 반경, S_{fin} 은 방향타의 투영면적, x_{fin} 은 선체 부력중심에서 x 축 방향타 도심까지의 거리이다. c_{df} 는 방향타의 cross flow drag 계수로서 식(4.10)로 정의할 수 있다.

$$c_{df} = 0.1 + 0.7t \quad (4.10)$$

여기서, t 는 방향타의 윗면길이와 아랫면길이의 비를 의미한다. 식 (4.10)에 t 의 값을 대입하면 식 (4.11)과 같이 c_{df} 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 c_{df} &= 0.1 + 0.7t \\
 &= 0.1 + 0.7\left(\frac{59}{89}\right) \\
 &= 0.564
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

비선형 항력계수는 식(4.9)와 같이 이론식을 이용해 구한다. 식(4.9)의 경우 AUV의 형상을 실린더로 가정했을 때의 항력계수를 이용하여 비선형 cross flow 계수 값을 구하였다. 본 연구에서 항력계수는 실제모델을 그대로 적용하였고, CFD를 이용하여 구하였다. CFD를 이용한 자율무인잠수정의 cross flow drag를 계산하기 위한 해석영역의 정의와 조건은 Fig. 4.7과 같다.

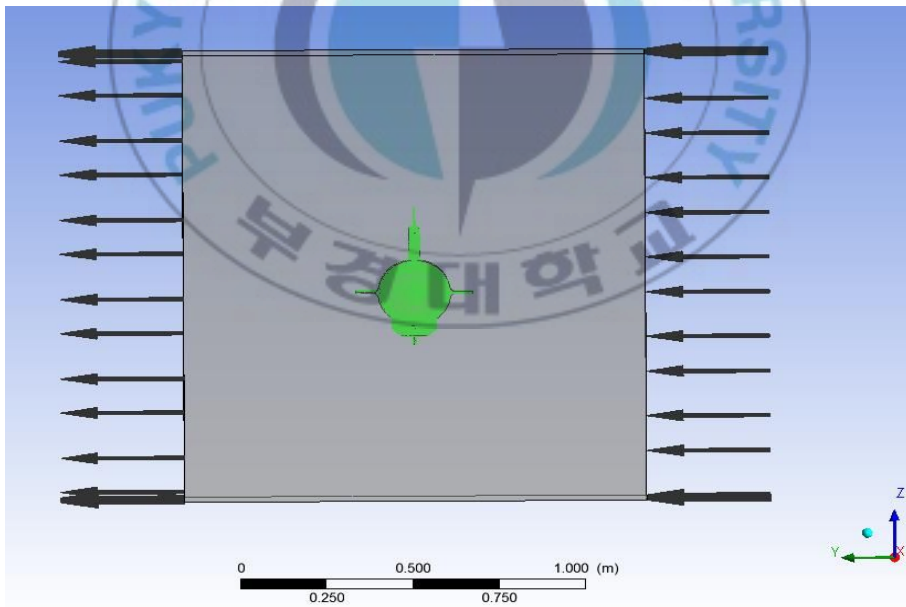


Fig. 4.7 Cross flow CFD 해석영역 및 조건설정

AUV의 Cross flow 항력계수를 구하기 위해서는 Cross flow 방향의 투영면적을 정의해야한다. Fig. 4.8은 Cross flow 방향 AUV의 투영면적이다.

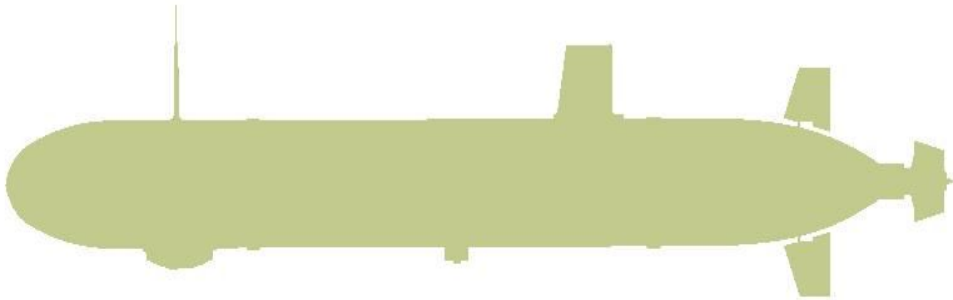


Fig. 4.8 AUV의 Cross flow 방향 투영면적

Catia에 의해 계산되어진 AUV의 Axial 방향 투영면적은 0.343m^2 이다. 이 결과 값을 이용해 Cross flow 방향 항력계수 값을 계산할 수 있다. Cross flow drag값을 구하기 위해 선체의 Y축 방향으로 유체를 흘려서 이때의 저항을 CFD로 구하였다. 해석결과와 관련된 그래프는 Fig. 4.9와 같다.

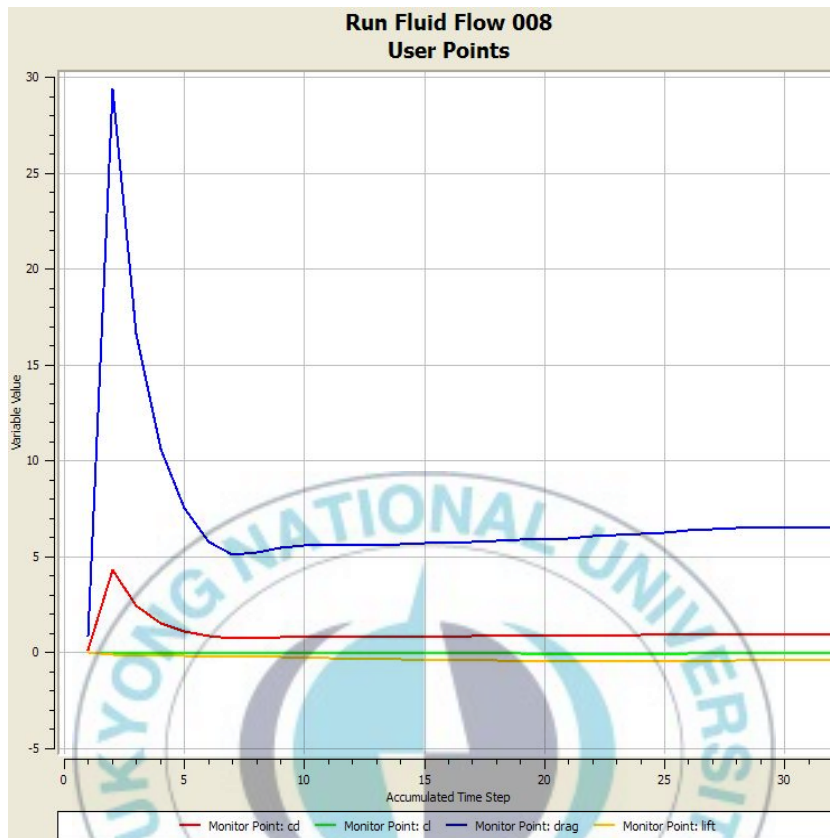


Fig. 4.9 Cross flow 항력과 항력계수 모니터링

약 28번의 Iteration을 통해서 항력과 항력계수의 결과 값이 수렴하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.9의 경우 0.2m/s의 속도로 자율무인잠수정의 Y축 길이방향으로 유체를 흘렸을 때 발생하는 결과 값을 나타내고 있다.

유사한 방법으로 0.4m/s, 0.6m/s, 0.8m/s에서의 해석을 통해서 선체에 발생하는 항력과 항력계수 값을 구하였다. 이와 관련된 내용은 Table. 4.3과 같다.

Table. 4.3 자율무인잠수정의 Cross flow 항력 및 항력계수

Velocity (m/s)	Reynolds No.	Cross flow Drag Force (N)	Cross flow Drag Coefficient
0.2 (m/s)	4.070E+05	6.492 (N)	0.949
0.4 (m/s)	9.379E+05	24.862 (N)	0.909
0.6 (m/s)	1.407E+06	54.815 (N)	0.891
0.8 (m/s)	1.876E+06	96.218 (N)	0.879
Average			0.907

Table. 4.3과 같이 속도가 증가함에 따라 항력 값이 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. CFD해석을 이용해 구한 Cross flow Drag Coefficient는 0.907이다. 이와 같은 결과 값은 회류수조를 이용한 시험 값과 비교하여 CFD해석의 신뢰성을 검증하였다.

4.2.3 시험을 통한 항력 및 항력계수 측정

시험은 수산과학원 회류시험수조에서 실시하였으며, 수조 왼쪽에 있는 대형 프로펠러가 일정 유속을 만들어내면 인장형 로드셀이 AUV에 걸리는 장력을 측정하는 방식으로 진행하였으며, 전면항력계수 측정을 위한 전면부 시험과 측면항력계수 측정을 위한 측면부 시험으로 나누어 시험하였다. 측정방법과 관련된 개념은 Fig. 4.10과 같고 Fig. 4.11은 실제 시험하는 장면을 나타내고 있다.

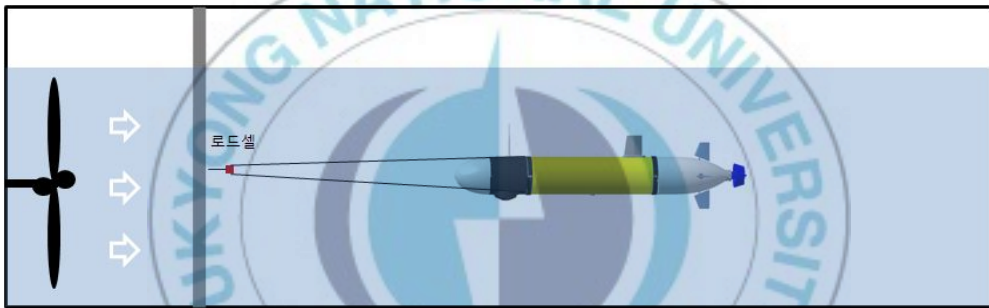


Fig. 4.10 항력 및 항력계수 측정시험개념

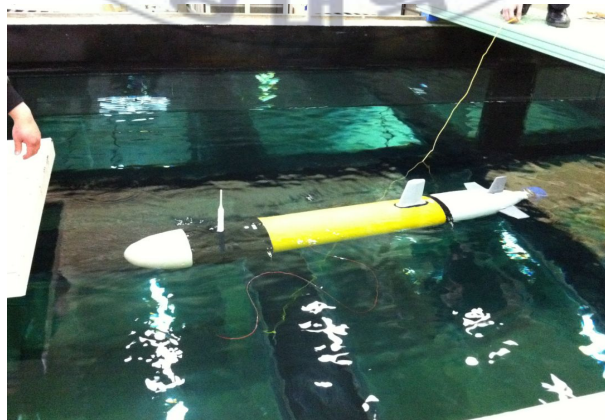


Fig. 4.11 항력 및 항력계수 측정시험

Table. 4.4와 Table. 4.5는 각각 Axial flow, Cross flow에 대해 측정된 항력과 항력계수를 나타낸다.

Table. 4.4 Axial flow 항력 및 항력계수 측정값

Velocity (m/s)	Axial Drag Force (N)	Axial Drag Coefficient
0.8 (m/s)	5.150 (N)	0.389
1.0 (m/s)	7.299 (N)	0.353
1.2 (m/s)	12.880 (N)	0.432
1.4 (m/s)	16.834 (N)	0.415
1.6 (m/s)	22.337 (N)	0.421
Average		0.402

Table. 4.5 Cross flow 항력 및 항력계수 측정값

Velocity (m/s)	Cross flow Drag Force (N)	Cross flow Drag Coefficient
0.2 (m/s)	4.395 (N)	0.67
0.4 (m/s)	24.486 (N)	0.90
0.6 (m/s)	54.897 (N)	0.89
0.8 (m/s)	96.176 (N)	0.72
Average		0.80

4.2.4 결과 값 비교

CFD해석을 통한 결과 값과 시험 결과 값을 비교하였다. Fig. 4.12과 Fig. 4.13은 각각 속도에 따른 Axial flow와 Cross flow에 대한 항력을 나타낸다. 그림과 같이 결과 값이 유사한 경향을 보인다.

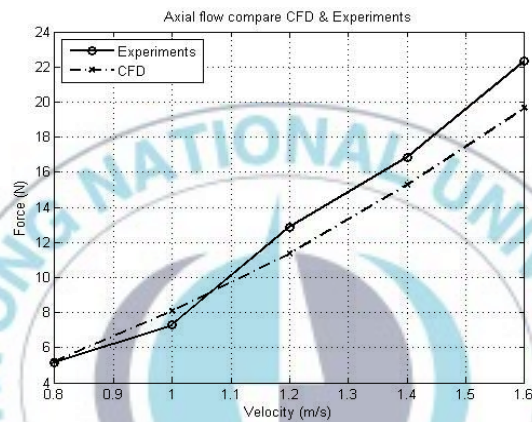


Fig. 4.12 CFD와 시험에 의한 Axial flow 항력 값 비교

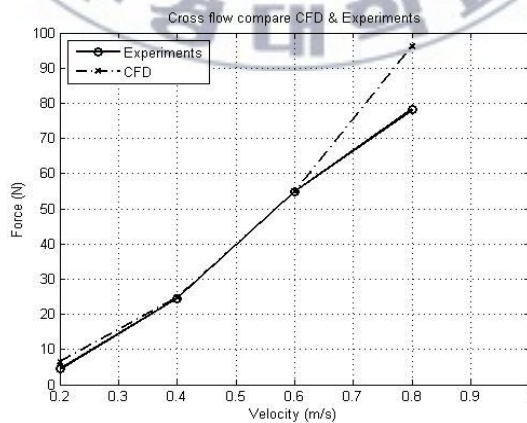


Fig. 4.13 CFD와 시험에 의한 Cross flow 항력 값 비교

4.3 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 부가질량(Added Mass)라고 한다.[16]

x-z평면과 x-y평면에 대해서 선체형상이 대칭이라고 한다면 식 (4.12)와 같이 Added mass 행렬로 나타낼 수 있다.[9]

$$M_A = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

식(4.12)를 Kirchhoff 방정식에 대입하여 식(4.13)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$X_A = X_u \dot{u} + Z_w wq + Z_q q^2 - Y_v vr - Y_r r^2$$

$$Y_A = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + X_u ur - Z_w wp - Z_q pq$$

$$Z_A = Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} - X_u uq + Y_v vp + Y_r rp$$

$$K_A = K_p \dot{p} - (Y_v - Z_w)vw - (Y_r + Z_q)wr + (Y_r + Z_q)vq - (M_q - N_r)qr$$

$$M_A = Z_q (\dot{w} - uq) + M_q \dot{q} - (Z_w - X_u)wu - Y_r vp + (K_p - N_r)rp$$

$$N_A = Y_r \dot{v} + N_r \dot{r} - (X_u - Y_v)uv + Y_r ur + Z_q wp - (K_p - M_q)pq$$

(4.13)



4.3.1 Axial Added Mass

Axial 방향의 added mass는 식(4.14)와 같다.

$$X_u = -\frac{4\beta\rho\pi}{3}\left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (4.14)$$

여기서, β 는 길이와 직경의 비에 의해 결정되는 값으로 본 연구의 모델은 l/d 가 8.7로서 0.2261의 값을 가진다.[12]

4.3.2 Cross flow Added Mass

AUV 선체의 형상이 실린더 형상이라고 가정하여 식(4.15)와 같이 정의할 수 있다.[12]

$$\begin{aligned} Y_v = Z_w = & -\int_{x_t}^{x_f} m_a(x)dx - \int_{x_f}^{x_{f2}} m_{af}(x)dx - \int_{x_{f2}}^{x_{b2}} m_a(x)dx \\ M_w = -N_v = & -Y_r = Z_q = \int_{x_t}^{x_f} x m_a(x)dx - \int_{x_f}^{x_{f2}} x m_{af}(x)dx - \int_{x_{f2}}^{x_{b2}} x m_a(x)dx \\ M_q = N_r = & -\int_{x_{tail}}^{x_{fin}} x^2 m_a(x)dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} x^2 m_{af}(x)dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bou2}} x^2 m_a(x)dx \end{aligned} \quad (4.15)$$

계산되어진 값은 [부록]에 첨부하였다.

4.4 방향타에 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(4.16)과 같이 나타낼 수 있고 항력은 식(4.17)과 같이 나타낼 수 있다.[12]

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A_{fin} \quad (4.16)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A_{fin} \quad (4.17)$$

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

방향타의 양력 및 모멘트 계수와 관련된 내용은 각각 식(4.18), 식(4.19)와 같다.

$$\begin{aligned} Y_{uu\delta_r} &= -Y_{uvf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} \\ Z_{uu\delta_s} &= Z_{uvf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} \\ Y_{urf} &= -Z_{uqf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$M_{uu\delta_s} = M_{uwf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}$$

$$N_{uu\delta_r} = -N_{wff} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}$$

$$M_{uuf} = N_{wrf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}^2$$

(4.19)

계산 되어진 값은 [부록]에 첨부하였다.



4.5 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. 본 연구에서는 횡동요는 고려하지 않는다.

4.6 외력과 모멘트

본 논문에서는 선형 관성력, 선형 감쇠, 비선형 감쇠와 관련된 유체항력 계수를 고려하여 식(4.20)과 같이 유체항력 모델을 구성하였다.

$$\begin{aligned}
 \sum X &= X_{HS} + X_{uu}u^2 + X_u\dot{u} + X_{uq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{prop} \\
 \sum Y &= Y_{HS} + Y_{vv}v^2 + Y_{rr}r^2 + Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{\phi}\phi \\
 &\quad + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \\
 \sum Z &= Z_{HS} + Z_{ww}w^2 + Z_{qq}q^2 + Z_w\dot{w} + Z_q\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp \\
 &\quad + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uudeltas}u^2\delta_s \\
 \sum K &= K_{HS} + K_{pp}p^2 + K_p\dot{p} + K_{prop} \\
 \sum M &= M_{HS} + M_{ww}w^2 + M_{qq}q^2 + M_w\dot{w} + M_q\dot{q} + M_{uq}uq \\
 &\quad + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uudeltas}u^2\delta_s \\
 \sum N &= N_{HS} + N_{vv}v^2 + N_{rr}r^2 + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{ur}ur \\
 &\quad + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

제 5 장 AUV 제어기 설계

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. 제어기는 6자유도 운동방정식을 수직면 운동과 수평면 운동으로 분리 시켜 수직면 제어기와 수평면 제어기로 나누어 구성하였다. 2가지의 제어기를 설계하여 3차원 공간상에서 AUV의 선형화된 시뮬레이션을 수행하였다.[17][18] 시뮬레이션은 무인잠수정의 수평면, 수직면에 대해 독립적으로 설계된 제어 알고리즘을 적용하여 요구되는 방향타의 각을 계산하였고, 선형모델에 적용된 제어입력 상수를 비선형 모델에 적용하여 자율무인잠수정의 운동성능 시뮬레이션을 수행하였다. 유체항력 계수들은 4장에서 이론식을 이용하여 계산하였으며, [부록]에 나타내었다.

5.1 운동방정식의 선형화

5.1.1 수평면 운동 선형화

3장에서 기술한 6자유도 운동방정식에 4장의 유체항력을 적용한 방정식을 수평면에 대한 운동 모델로 선형화 시키면, 식(5.1)과 같다.[10][18]

$$\begin{aligned}
 & I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \\
 &= N_{HS} + N_{|v|v}|v| + N_{|r|r}|r| + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

수평면 운동만 존재하고, 횡동요(Roll)가 없다고 가정하면 식 (5.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w=0, \dot{z}=0, \dot{\phi}=\dot{\theta}=0, p=q=0 \tag{5.2}$$

또 부력중심을 원점으로 하는 선체고정 좌표계를 기준으로 x-y평면과 x-z평면에 대해 대칭이므로 관성곱 I_{xy} , I_{yz} , I_{xz} 는 주관성 모멘트에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 무게 중심 CG는 부력중심좌표에 대해 x축과 y축 방향으로 일치하며, z축에 대해 0.02m 아래에 위치하며 식(5.3)과 같다.

$$I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0, \quad x_G = y_G = 0 \quad (5.3)$$

유체역학적 힘과 모멘트인 유체정역학적 성분, Added mass에서 0의 값을 가지는 커플링 성분, 방향타에 의한 성분 그리고 Drag의 2차 이상 고차항 성분을 선형화 한 후 식(5.2)와 식(5.3)을 식(5.1)에 대입하면 식(5.4)와 같다.

$$(I_{zz} - N_r)\dot{r} = N_r r + N_{\delta_r} \delta_r \quad (5.4)$$

식(5.4)의 행렬 형태로 나타내면 식(5.5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (5.5)$$

선형화 된 수평면 운동식의 피드백 제어를 적용하기 위해서는 가 제어성 및 가관측성을 만족해야 한다. 이를 위해 식(5.5)를 상태 공간행렬로 나타내면 식(5.6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (5.6)$$

식(5.6)를 정리하면 식(5.7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_{zz} - N_r} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (5.7)$$

4장에서 구한 유체항력 계수 값을 식(5.7)에 대입하여 정리하면 식 (5.8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1127 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.2033 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (5.8)$$



5.1.2 수직면 운동 선형화

3장에서 기술한 6자유도 운동방정식에 4장의 유체항력을 적용한 방정식을 수직면에 대한 운동 모델로 선형화 시키면, 식(5.9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\
 &= M_{HS} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw \\
 &+ M_{u\delta_s}u^2\delta_s
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

수평면 운동과 마찬가지로 수직면 운동만 존재하고, 관성곱의 크기가 주관성모멘트에 비해 매우 작아서 무시할 수 있다. 횡동요가 없다고 가정하면 식 (5.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & v = 0, \dot{y} = 0, \dot{\phi} = \dot{\psi} = 0, p = r = 0 \\
 & I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0, x_G = y_G = 0
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

유체역학적 힘과 모멘트인 유체정역학적 성분, Added mass에서 0의 값을 가지는 커플링 성분, 방향타에 의한 성분 그리고 Drag의 2차 이상 고차항 성분을 선형화하면 식 (5.11)과 같다.

$$\begin{aligned}
(I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} &= M_q q - z_G W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \\
\dot{z} &= -U \theta \\
q &= \dot{\theta}
\end{aligned} \tag{5.11}$$

식(5.11)을 행렬로 나타내면 식(5.12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q & z_G & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \tag{5.12}$$

식(5.12)의 형태를 변형하면 식(5.13)과 같다.

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

$$z = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

4장에서 구한 유체항력 계수 값을 식(5.13)에 대입하여 정리하면 식(5.14)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1135 & -0.1399 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.2032 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad (5.14)$$



5.2 제어기 설계

5.2.1 수평면 제어기

5.1절에서 선형화한 수평면 운동 모델의 시스템이 가제어성을 확인한다. 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 상태임을 알 수 있고 PD 제어기 설계를 통해 제어가 가능하다. 시스템의 개루프 전달 함수를 구해보면 식 (5.15)와 같다.[11][20]

$$G = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{\frac{N_{\delta_r}}{I_{zz} - N_r}}{s(s - \frac{N_r}{I_{zz} - N_r})} = \frac{-0.2033}{s(s + 0.1127)} \quad (5.15)$$

PD제어기에 적용할 입력각 δ_r 과 비례상수 K_p , 미분상수 K_d 의 관계식은 식(5.16)과 같다.

$$\delta_r = K_p(\psi_d - \psi) - K_d\dot{\psi} \quad (5.16)$$

시스템의 페루프 전달함수는 식(5.17)과 같다.

$$G(s) = \frac{-0.2033(K_p + K_d s)}{s^2 + (0.1127 - 0.2033K_d)s - 0.2033K_p} \quad (5.17)$$

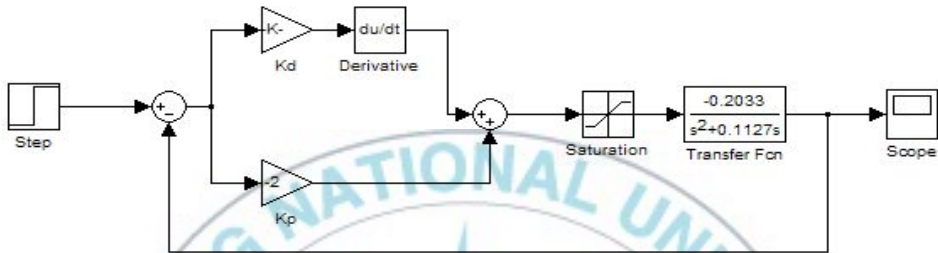


Fig. 5.1 Heading Control System Block Diagram

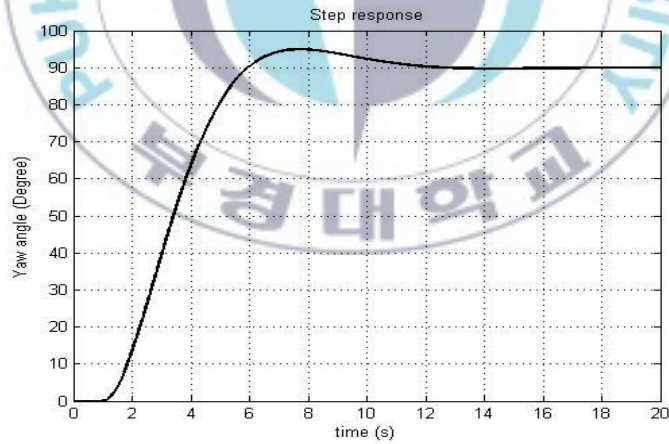


Fig. 5.2 Heading Control System Step Response

Fig. 5.1과 Fig. 5.2와 같이 시행착오법을 이용하여 비례상수(K_p)와 미분상수(K_d)를 구하였다. 구해진 값은 각각 K_p 는 -2, K_d 는 -4이다.

5.2.2 수직면 제어기

4장에서 기술한 수직면 운동 모델 선형화를 거친 운동방정식을 다시 나타내면 식 (5.18)과 같다.[21][22]

$$\begin{aligned}(I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} &= M_q q - z_G W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \\ \dot{z} &= -U \theta \\ q &= \dot{\theta}\end{aligned}\tag{5.18}$$

식(5.18)을 상태 공간 행렬로 고치면 식 (5.19)와 같다.

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} & \frac{-z_G W}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \\ z &= [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{5.19}$$

AUV가 1.0m/s의 정속으로 운항할 때, [부록]의 계수 값을 참고하여 수치를 대입하면 식(5.20)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1135 & -0.1399 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.2032 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad (5.20)$$

MATLAB을 이용하여 시스템의 가제어성을 판단하였다. 시스템의 rank는 3이고, $|U_c| = 0.0084 \neq 0$ 이므로 가제어 조건을 만족한다. 따라서 수직면 제어 운동모델의 시스템은 가제어임을 알 수 있다.

깊이 제어기는 스티븐 방향타에 따른 종동요각과 스티븐방향타에 따른 무인잠수정의 깊이로 나눌 수 있다.

$$G_\theta = \frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{\frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q}}{s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q}s + \frac{z_G W}{I_{yy} - M_q}} = \frac{-0.2032}{s^2 + 0.1135s + 0.1399} \quad (5.21)$$

$$G_z = \frac{z(s)}{\theta(s)} = -\frac{U}{s} = -\frac{1}{s} \quad (5.22)$$

PD제어기에 적용할 입력각 δ_s 와 비례상수 K_p , 미분상수 K_d 의 관계식은 식(5.23)과 같다.

$$\delta_s = K_{zp}e_z + K_p\theta + K_d\dot{\theta} \quad (5.23)$$

식(5.21)의 피치제어 개루프 전달함수에 PD계수를 적용한 폐루프 전달 함수는 식(5.24)와 같다.

$$G_{\theta}(s) = \frac{-0.2032}{s^2 + (0.1135 - 0.2032K_d)s + (0.1399 - 0.2032K_p)} \quad (5.24)$$

깊이제어와 피치제어를 적용한 수직면 운동모델 시스템의 폐루프 전달함수는 식(5.25)와 같다.

$$G_{depth}(S) = \frac{0.2032K_{zp}}{s^3 + (0.1135 - 0.2032K_d)s^2 + (0.1399 - 0.2032K_p)s + 0.2032K_{zp}} \quad (5.25)$$

Simulink를 이용하여 시스템 피드백 상수의 계산은 Fig. 5.3과 같다.

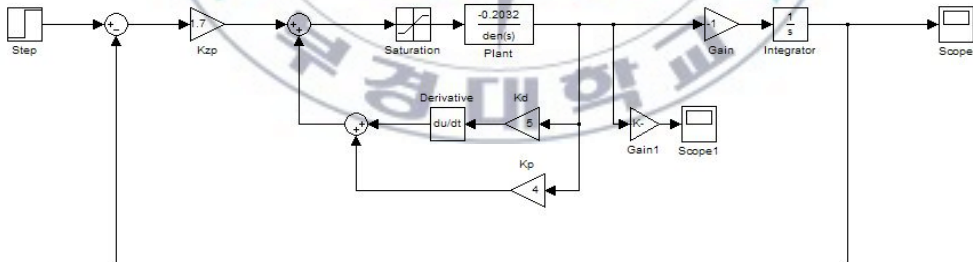


Fig. 5.3 Depth Control System Block Diagram

시행착오법을 이용하여 비례상수(Kp), 미분상수(Kd)와 깊이제어상수(Kzp)를 구하였다. Kp, Kd 그리고 Kzp의 값은 각각 4, 5, 1.7이다. 계산된 결과 값을 식(5.23)에 대입하면 식(5.26)과 같다.

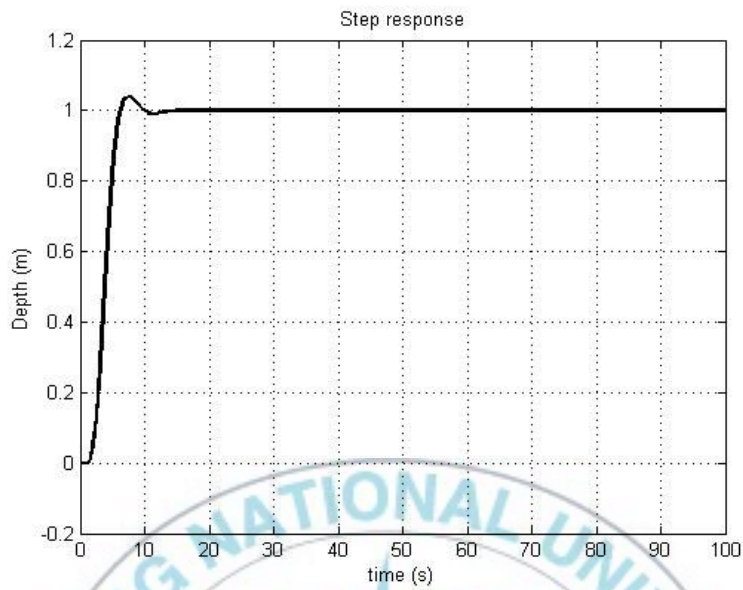


Fig. 5.4 Depth Control System Step Response

$$\delta_s = 1.7(z_d - z) + 4 \times \theta + 5 \times q \quad (5.26)$$

5.3 운동 시뮬레이션

5.3.1 선회운동 시뮬레이션

수평면상에서 AUV의 선회운동 성능 시뮬레이션을 수행하기 위해 10도, 20도, 30도의 상하방향타각에 대한 선체의 선회능력은 각각 Fig. 5.5와 같다. 이때, 선체의 운항속도는 1m/s의 정속운항이다.

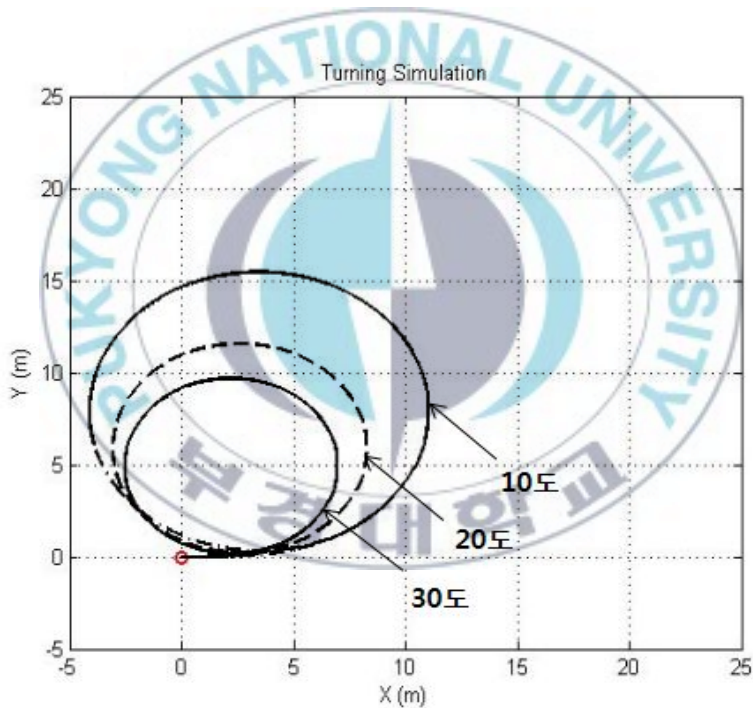


Fig. 5.5 상하 방향타각에 따른 선회반경

Fig. 5.5에서 방향타의 각이 작을수록 선회반경이 큰 것을 알 수 있다.

5.3.2 Way-point 시물레이션

AUV가 수평면상의 Way-Point 추종 운동능력 성능과 관련된 시물레이션을 수행하였다. Fig. 5.6과 같이 전역좌표계에 1 ~ 7까지의 점을 ‘ㄷ’자 형으로 선택한 후 각 점을 통과하는 AUV의 경로를 나타내었다. AUV는 목표지점과 현재위치 사이의 각도를 계산하여 각도의 오차를 보정하는 방식의 알고리즘으로 구성된다.[23]

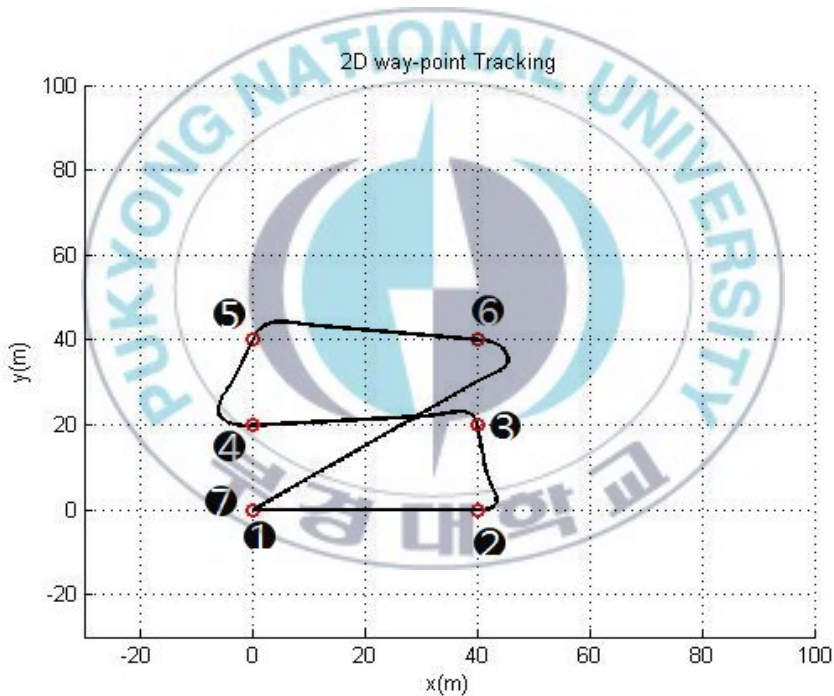


Fig. 5.6 수평면 Way-point 운동성능

Fig. 5.6은 1m/s의 정속운항을 기준으로 비선형 모델에 대해 외란이 없는 상태에서 주어진 way-point를 통과하는 것을 알 수 있다.

수평면 way-point 추적능력 시뮬레이션 결과를 바탕으로 3차원 공간상에 존재하는 목표지점에 대해서 AUV의 운동성능 시뮬레이션을 수행하였다. 3차원 공간상의 좌표는 $[0, 0, 0]$, $[20, 20, -5]$, $[50, 40, -10]$, $[80, 60, -15]$, $[40, 80, -10]$, $[0, 0, 0]$ 이다. AUV의 way-point 추적능력과 관련된 시뮬레이션 결과는 Fig. 5.7과 같다.

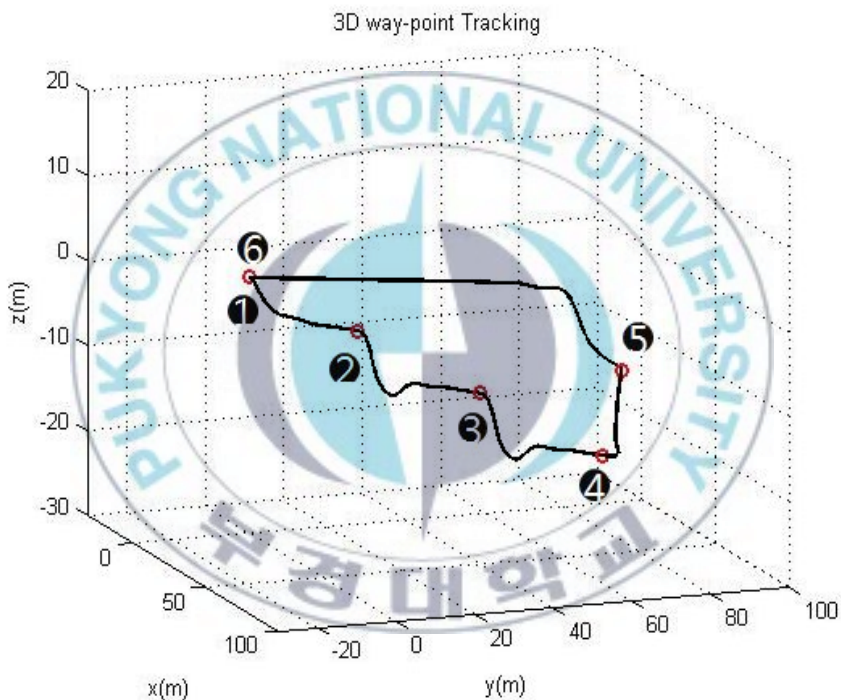


Fig. 5.7 3차원 Way-point 추적 시뮬레이션

5.2장의 수평면 제어기와 수직면 제어기를 적용하여 3차원 공간상의 목표지점을 추적할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 알 수 있다. 이때, 외란에 의한 오차 발생은 고려하지 않았다.

제 6 장 AUV 운동성능 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.1 수평면 운동

6.1.1 직진도 시험

AUV가 외란이 없는 상태에서 수평면상에서 직진운동 성능 시험을 실시하였다. 시험은 실내수영장에서 실시하였으며 수영장의 경우 조류나 해류에 의한 외란이 거의 없기 때문에, 외란을 고려하지 않는 AUV의 직진운동 시뮬레이션 결과 값과 유사하게 나오는 것을 알 수 있다. 1m/s의 속도로 시험을 진행하였으며, Fig. 6.1은 시뮬레이션과 수영장에서의 시험결과를 비교한 그래프이다.

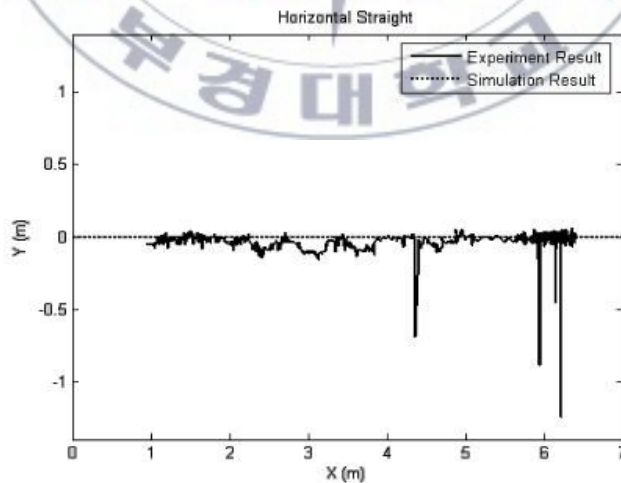


Fig. 6.1 수평면상의 직진성 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.1.2 선회운동 시험

AUV의 수평면상에서 선회운동 성능을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 이때, 앞서 5장에서 설계하였던 수평면 제어기를 사용하여 선회운동에 대한 시뮬레이션을 수행하여 측정값과 비교하였다. 수평면상에서의 운동은 추진기에 의한 추력과 상하 방향타에 의해서 제어가 가능하다. AUV의 속도는 1m/s 로 정속주행을 한다고 가정하고, 선체는 중성부력상태로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6.2는 상하 방향타의 각을 30° 로 하였을 때 수평면상의 선회운동 능력에 관련된 그림이다. 선회운동 시뮬레이션 결과에 비해 실험 결과 값의 선회경로가 오른쪽으로 치우친 타원 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 실험에서 발생하는 조류와 해류에 의한 영향으로 인해 AUV가 선회 운동 시 선체가 외란에 의한 방향으로 밀리는 것으로 예측할 수 있다. 또한 시뮬레이션 상의 AUV는 중성부력상태로 가정했지만, 실제 AUV는 약간의 양성부력을 가지고 있기 때문에, 이로 인해 수평면상에서 상부 방향타에 의해 선회성능이 제대로 적용되지 못한 결과로 판단되어진다.

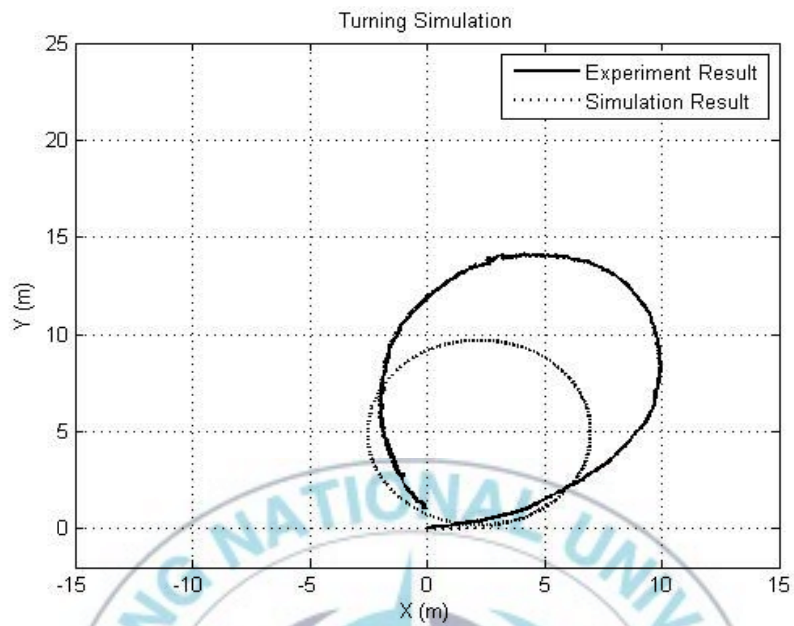


Fig. 6.2 선회운동 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.2 Way-point 시험

수평면상에서 경로추적시험을 실시하였다. Way-point 좌표는 시작점을 기준으로 절대좌표 $(0, 0, 0)$, $(30, 10, 0)$, $(40, 0, 0)$, $(30, -10, 0)$, $(0, 0, 0)$ 이며 실험역에서 실시하였다. Fig. 6.3을 보면 시험 결과 조류의 영향이 있음에도 불구하고 경로는 잘 추적해가는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션의 경우 외란이 없는 상태이기 때문에 목표지점을 오차범위 안에서 잘 추적하는 것을 알 수 있다.

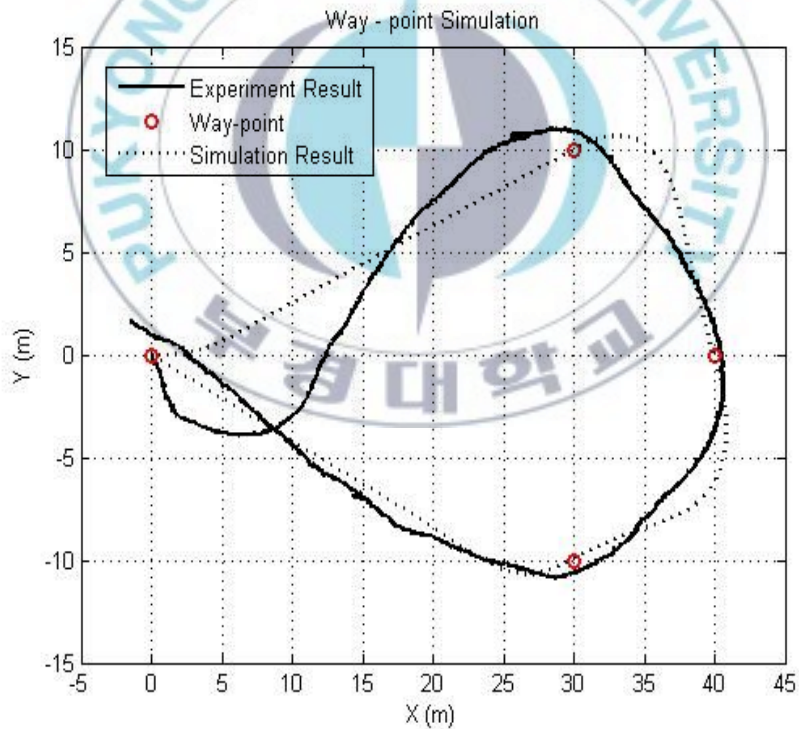


Fig. 6.3 Way-point 시험과 시뮬레이션 결과 비교

6.3 깊이제어 시험

AUV의 잠수성능을 확인하기 위해 0.5m 깊이를 목표수심으로 하는 시뮬레이션과 시험을 실시하였다. Fig. 6.4는 수심 0.5 m로 잠수운항을 계속하도록 하는 시뮬레이션과 실제 시험결과를 비교한 그래프이며 두 가지 경우 모두 일정 수심을 잘 유지하는 것을 알 수 있다.

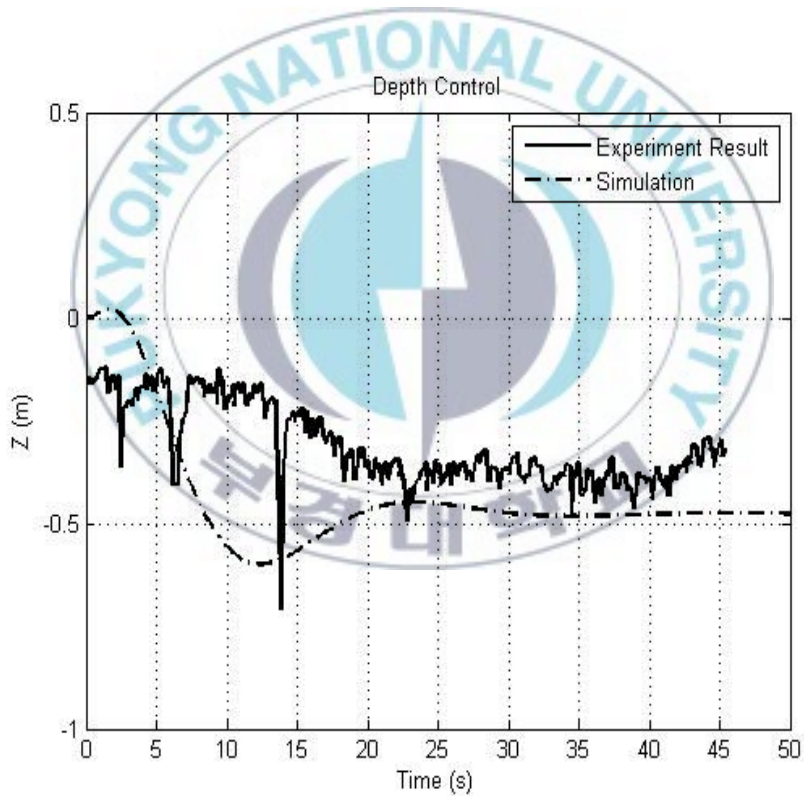


Fig. 6.4 깊이제어 시험과 시뮬레이션 결과 비교

제 7장 결론

본 논문에서는 자율무인잠수정의 기초설계를 바탕으로 선체의 선형과 비선형계수를 이론식과 CFD를 이용하여 계산하였고, 결과 값을 시뮬레이션에 적용하여 선형제어기를 적용한 비선형 모델의 운동성능 특성을 시뮬레이션과 시험 값을 이용하여 비교하였다. 결과 값을 바탕으로 유체항력 계수의 이론적 계산에 대한 유효성을 검증하였다. 1.5m/s로 운항 시 자율무인잠수정 주변의 유체흐름과 선체에 작용하는 압력분포를 구하여, 최대 운용수심에서 선체에 발생하는 응력과 비교하였다. 200m 깊이에서의 최대응력 34.5Mpa이고, 1.5m/s로 운항 시 선체에 발생하는 최대 응력은 1571.11pa로 나타났다. 선체의 항복강도인 55.2Mpa보다 적은 응력이 발생하므로 안전한 설계임을 알 수 있었다. CFD를 이용하여 자율무인잠수정에 작용하는 Axial flow, Cross flow에 대한 항력을 구하였고, 회류수조 시험에서 얻은 시험 값과 비교하여 시뮬레이션 결과 값을 검증하였다. 이론식을 이용하여 선체의 외력으로 정의되는 Hydrostatic force, Hydrodynamic damping, Added mass, 방향타 및 추진기에 의한 선형 및 비선형 계수 값을 계산하여 자율무인잠수정의 운동방정식에 적용하였다. 3차원 공간상에서 자율무인잠수정의 운동을 제어하기 위해 선체의 운동특성에 비교적 적은 영향을 미치는 선체의 비선형 요소 및 고차항에 대해서 선형화하여 수평면과 수직면의 외란을 고려하지 않는 선형 PD제어기를 설계하였다. 설계된 제어기를 MATLAB에 적용하여 선체의 직진제어, 심도제어, 선회능력 시뮬레

이션을 수행하였다. 외란을 고려하지 않았기 때문에, 직진 및 심도는 원활히 제어되는 것을 알 수 있었다. 선회능력 시뮬레이션에서 상하방향타의 각이 커질수록 선회반경이 작아지고, 한계각인 30도에서 선회반경이 10m로 나타났다. 이러한 시뮬레이션 결과로 way-point 경로추적 시에 목표지점사이의 간격이 10m 이내로 정의해야 하며, 시험결과 값과 비교했을 때 조류의 영향 등을 고려했을 경우 목표지점사이의 간격은 15m 이상으로 설정해야 경로추적에 무리가 없을 것으로 판단된다. 기본성능에 대한 시뮬레이션과 시험을 바탕으로 way-point 경로추적에 대한 시뮬레이션과 시험을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 수평면상에서 목표지점 추적능력을 검증하기 위해 수평면 상에 임의의 4점을 정의하고 최소간격 10m로 설정하였다. 시뮬레이션과 시험결과 모두 이상 없이 목표지점을 잘 추적하는 것을 알 수 있었다. 3차원 공간상에서 깊이와 간격을 달리한 way-point를 시뮬레이션을 수행한 결과, 설정한 임의의 목표지점을 이상 없이 잘 추적하는 것을 알 수 있었다. 이러한 시뮬레이션 결과와 시험결과의 비교 검증을 통해 이론적인 계산에 의해 정의된 계수 값을 적용하였을 때 선체의 운동성능 예측이 가능하다고 판단되어진다.

향후 연구에서는 이론적으로 계산되어진 결과 값을 선체계수 측정 시험을 통해서 비교하여, 계산 값의 신뢰성을 확인하는 연구가 필요하며, 외란이 주어졌을 때, 선체의 운동성능에 대한 연구가 진행되어야한다.

참 고 문 헌

- [1] P. M. Lee, (2007), "Development of an advanced deep-sea unmanned underwater vehicle(1)," Korea Ocean Research & Development Institute.
- [2] B. H. Jun, P. M. Lee, Y. K. Lim, (2009), "Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 5, pp. 14-22
- [3] S. C. Yu, (2009), "Introduction to Specific Purpose AUV and Applications," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 5, pp. 33-40
- [4] Bob Anderson and Jon Crowell, (2005), "Workhorse AUV-A cost-sensible new Autonomous Underwater Vehicle for Surveys/ Soundings, Search & Rescue, and Research"
- [5] Roger P. Stokey, Alexander Roup, "Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle", Jane's Underwater Security Systems and Technology, April 22, 2009
- [6] F. Y. Lee, B. H. Jun, P. M. Lee, "Implementation and test of ISIMI100 AUV for a member of AUVs Fleet", IEEE/MTS OCEANS 2008, Quebec City, 15-18 Sept. 2008
- [7] T. Prestero, "Development of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", OCEANS 2001, MTS/IEEE Conference and Exhibition, vol.1, pp. 450-455

- [8] Michael S. Triantafyllou, Franz S. Hover, "MANEUVERING AND CONTROL OF MARINE VEHICLES", Maneuvering and Control of Marine Vehicles, Nov. 5, 2003
- [9] T. I. Fossen, Guidance and control of ocean vehicle, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [10] SNAME, "The society of naval architects and marine engineers, nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid.", Technical and Research Bulletin, vol. 1-5, 1950.
- [11] M. W. Kim, "Motion Simulations and Experiments of An Autonomous Underwater Vehicle for Shallow-water Operations", M. S. thesis, PKNUN, 2011
- [12] T. Prestero, "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," M. S. thesis, MIT/WHOI, 2001.
- [13] "ANSYS CFX-Basic", Release 12.0
- [14] T. H. Joung, Karl Sammut, Fangpo He and S. K. Lee, "A Study on the Motion Analysis and Design Optimization of a Ducted Type AUV by Using CFD Analysis", Journal of Ocean Engineering and Technology Vol. 23, No. 1, pp. 48-53
- [15] Kallineris, Y, (1996), "Applied Numerical Mathematics", Vol. 20, No. 4, pp. 387-406
- [16] Frank M. White, "Fluid Mechanics", 6th Ed. McGRAW-HILL
- [17] B. Jalving, (Oct. 1994), "The NDRE-AUV flight control system," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 19, no. 4, pp. 497-501

[18] T. I. Fossen, Marine Control Systems. Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002

[19] J. Y. Park, "Experiment of Attitude Control for Autonomous Underwater Vehicle", M. S. thesis, Kaist, 2005

[20] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems", 5th Ed. Pearson Education.

[21] E. Y. Hong, H. G. Soon, Mandar Chitre, "Depth Control of an Autonomous Underwater Vehicle, STARFISH", OCEANS 2010 IEEE, Sydney, May 24-27, 2010

[22] K. M. Fauske, F. Gustafsson, Ø. Hegrenaes., "Estimation of AUV dynamic for sensor fusion", Information Fusion 10th International Conference., Quebec, Que., July 9-12, 2007

[23] K. S. Kim, Tamaki Ura, "3-Dimensional Trajectory Tracking Control of an AUV "R-One Robot" Considering Current Interaction", International Offshore and Polar Engineering Conference., Kitakyushu, Japan, May 26-31, 2002

부록

A. 유차항 계수

a) Hull parameter

Coefficients	AUV Ver.1
ρ (Wter Density, kg/m ³)	9.97E+02
A _f (Hull Frontal Area, m ²)	4.50E-02
A _p (Hull Projected Area, m ²)	3.43E-01
XZ-Plane	
S _w (Hull Wetted Surface Area, m ²)	1.26E+00
Vol (Estimated Hull Volume, m ³)	4.30E-02
W(Measured Vehicle Weight, N)	4.32E+02
B (Measured Vehicle Weight_Horizontal, N)	4.32E+02
x _{cb} (Estimated Long. Center of Buoyancy, m)	5.54E-03
C _d (Axial Drag Coeff., n/a)	3.53E-01
C _{dc} (Cylinder Cross-flow Drag Coeff., n/a)	9.07E-01

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

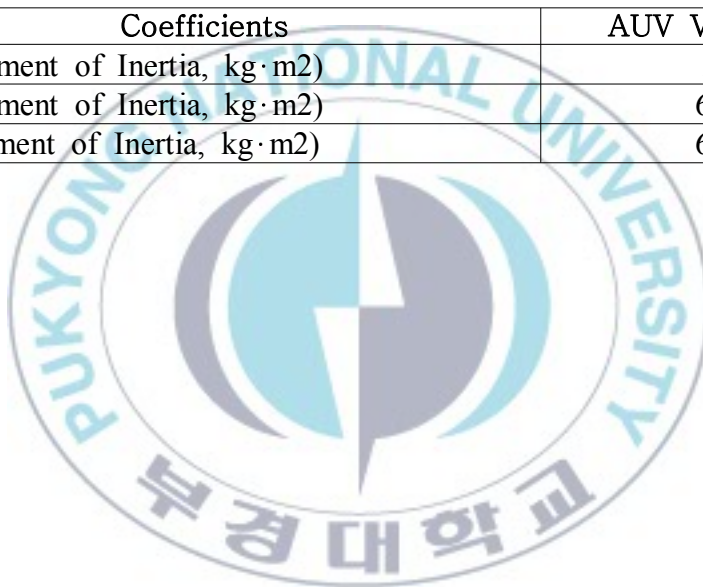
Coefficients	AUV Ver.1
x _B (Center of Buoyancy: X-dir, m)	0.00E+00
y _B (Center of Buoyancy: Y-dir, m)	0.00E+00
z _B (Center of Buoyancy: Z-dir, m)	0.00E+00

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

Coefficients	AUV Ver.1
xG (Center of Gravity: X-dir, m)	0.00E+00
yG (Center of Gravity: Y-dir, m)	0.00E+00
zG (Center of Gravity: Z-dir, m)	2.00E-02

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

Coefficients	AUV Ver.1
Ixx (Moment of Inertia, kg·m ²)	2.48E-02
Iyy (Moment of Inertia, kg·m ²)	6.53E+00
Izz (Moment of Inertia, kg·m ²)	6.51E+00



B. 무차항 계수

a) Non-linear Force Coefficients

Coefficients	AUV Ver.1
Xuu (Cross-flow Drag, kg/m)	-7.57E+00
Xudot (Added Mass, kg)	-9.44E-01
Xwq (Added Mass Cross-term, kg/rad)	-6.57E+01
Xqq (Added Mass Cross-term, kg·m/rad)	-5.54E+01
Xvr (Added Mass Cross-term, kg/rad)	6.57E+01
Xrr (Added Mass Cross-term, kg·m/rad)	-5.54E+01
Xprop (Propeller Thrust, N)	1.50E+01
Yvv (Cross-flow Drag, kg/m)	-1.89E+01
Yrr (Cross-flow Drag, kg·m/rad ²)	6.22E+00
Yuv (Body Lift Force and Fin Lift, kg/m)	-4.80E+01
Yvdot (Added Mass, kg)	-6.57E+01
Yrdot (Added Mass, kg·m/rad)	5.54E+01
Yur (Added Mass Cross Term and Fin Lift, kg/rad)	1.13E+01
Ywp (Added Mass Cross-term, kg/rad)	6.57E+01
Ypq (Added Mass Cross-term, kg·m/rad)	5.54E+01
YuudeltaR (Fin Lift Force, kg/(m·rad))	2.04E+01
Zww (Cross-flow Drag, kg/m)	-1.89E+01
Zqq (Crow-flow Drag, kg·m/rad ²)	-6.22E+00
Zuw (Body Lift Force and Fin Lift, kg/m)	-4.80E+01
Zwdot (Added Mass, kg)	-6.57E+01
Zqdot (Added Mass, kg·m/rad)	-5.54E+01
Zuq (Added Mass Cross-term and Fin Lift, kg/rad)	-1.13E+01
Zvp (Added Mass Cross-term, kg/rad)	-6.57E+01
Zrp (Added Mass Cross-term, kg/rad)	5.54E+01
ZuudeltaS (Fin Lift Force, kg/(m·rad))	-2.04E+01

b) Non-linear Moment Coefficients

Coefficients	AUV Ver.1
Kpp (Rolling Resistance, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2$)	-1.30E-01
Kpdot (Added Mass, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$)	-7.04E-02
Kprop (Propeller Torque, $\text{N} \cdot \text{m}$)	-8.04E-02
Mww (Cross-flow Drag, kg)	1.50E+01
Mqq (Cross-flow Drag, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2$)	-1.88E+02
Muw (Body and Fin Lift and Munk Moment, kg)	1.80E+01
Mwdot (Added Mass, $\text{kg} \cdot \text{m}$)	-5.54E+01
Mqdot (Added Mass, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$)	-5.40E+01
Muq (Added Mass Cross Term and Fin Lift, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	-5.43E+00
Mvp (Added Mass Cross Term, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	-5.54E+01
Mrp (Added Mass Cross Term, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2$)	5.39E+01
MuudeltaS (Fin Lift Moment, kg/rad)	-1.23E+01
Nvv (Cross-flow Drag, kg)	-1.50E+01
Nrr (Cross-flow Drag, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2$)	-1.88E+02
Nuv (Body and Fin Lift and Munk Moment, kg)	-3.12E+01
Nvdot (Added Mass, $\text{kg} \cdot \text{m}$)	1.93E+00
Nrdot (Added Mass, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$)	-5.40E+01
Nur (Added Mass Cross term and Fin Lift, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	-5.43E+00
Nwp (Added Mass Cross Term, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	-5.54E+01
Npq (Added Mass Cross Term, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2$)	-4.81E+00
NuudeltaR (Fin Lift Moment, kg/rad)	-1.23E+01

후기

학부 때부터 대학원까지 5년여 동안 생활을 하면서 항상 아낌없는 충고와 지도로 저를 이끌어 주신 백운경 교수님께 깊이 감사드립니다. 수중로봇분야에 대해서 연구를 진행하고 논문이 완성될 때까지 격려와 관심을 보여주신 것에 대해 감사합니다. 또한 과제를 함께 진행하며 저를 위해 좋은 가르침을 주셨던 주문갑 교수님과 부족한 논문을 위해 조언을 아끼지 않으셨던 이연원 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문을 완성하고 차후 진로 및 인생 상담에 대해 많은 조언을 해주셨던 윤영기 선배님, 현지민 선배님, 김명욱 선배님, 이동원 선배님, 서민교 선배님 감사드립니다. 선배님들의 조언 덕분에 시행착오를 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 상태와 봉준에게도 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 다른 실험실에 있으면서도 저에게 힘을 주었던 주성형, 세령형, 순태, 종민, 상균, 주영, 진석, 동협에게 진심으로 감사합니다. 실험실 업무 및 학교생활에 도움을 주었던 9공학관 조교선생님들, 또 제가 알고 지냈던 9공학관 선, 후배님들에게 감사의 뜻을 전합니다.

자율무인잠수정을 함께 개발하며 고생했던 서주노 교수님, 최형식 교수님, 강인필 교수님, 경모형, 호성형, 종수에게도 감사의 마음을 전합니다. 재밌고 힘들었던 학창시절을 함께 했던 영진형, 태형형, 재원형, 병기와 초등학교부터 친구인 창완, 상현, 태수 그리고 중, 고등학교 동창 영섭, 효재, 호준, 진호에게 고마움의 뜻을 전하고 싶습니다.

어려운 가정형편에 끝까지 믿고 석사학위 취득까지 기다려주신 어머니께 너무 감사하고 또 감사드립니다. 좋은 직장에 취업해서 꼭 효도하겠습니다. 마지막으로 작은 부분도 신경써서 챙겨주는 든든한 우리형이 있어서 모든 일에 자신감을 가지고 임할 수 있었던 것 같습니다. 항상 뒤에서 버팀목이 되어주는 가족들에게 떳떳하고 자랑스러운 아들과 동생이 되도록

하겠습니다. 저를 아껴주시는 모든 분들에게 마지막으로 감사의 뜻을 전하며 앞으로도 많은 바 포기하지 않고 열심히 하는 사람이 되겠습니다.

2011년 12월 논문작성을 마치고... 김창민

