



工學碩士 學位論文

# 조이스틱 컨트롤 기반 선박운동의 통합제어에 관한 연구

A Study on the Integrated Control of Ship Motion Based on Joystick Control



#### 2011年 8月

韓	國海	洋フ	大學	校	大學	院
制	御	計	測	T	學	科
崔			秉			燻

Abstract ······ii	1
List of Figures	1
List of Tables ······	Ū

제	1 る	ㅏ 서	론				 	1
1.1	연구	배경			RIH	1	 	1
1.2	연구	내용		KORE			 	2

제	2 장 선박의 조종운동 방정식	3
2.1	선박운동 좌표계와 운동변수의 정의	3
2.2	선박의 일반적인 6자유도 운동방정식	7
2.3	선박 통합제어시스템용 3자유도 운동방정식16	3

제	3 장 .	오퍼리	웨이터	조작	명령	인식과	명령	변수	기준값	생성·	·20
3.1	오퍼레	이터	조작명	령의	정의 ·			• • • • •	•••••		· 20
3.2	명령인	식 알	고리즘	과 명	령입력	기준값	생성	알고	리즘····		·23

제	4 장	요구취	추력과	요구추력」	모멘트의	계산	<b>.</b>	· · · · · · · ·	··41
4.1	요구	추력과	요구추	력모멘트를	계산하기	위한	3자유도	비선형	선박
	운동	방정식	•••••			••••			41
4.2	요구	선가속	도와 요	구 각가속!	도의 계산·				43

제	5 장	추	력할당일	날고리즘	• • • • •	• • • • • •				· · · <b>· ·</b>	·46
5.1	이동명	궝	모드1~모	드6에 디	배한 추	-력 할	당알고	리즘···	• • • • • •		· 47
5.2	선수중	심	선회명령	모드7에	대한	추력	할당알	고리즘	••••		·49
5.3	무게중	심	선회명령	모드8에	대한	추력	할당알	고리즘	••••		·51
5.4	선미중	심	선회명령	모드9에	대한	추력	할당알	고리즘			·53
5.5	명령모	드이	에 따른 Ri	udder의	타각명	경령 신	]성 알크	고리즘·			·54
				X0							
				roll							

제	6 장 시뮬레이션 및	고찰 1945	58
6.1	시뮬레이션용 선박제원	및 유체력 미계수	58
6.2	선박 통합제어시스템의	시뮬레이터 구성	62
6.3	선박 통합제어시스템을	이용한 선박의 조종성능 확인	69

제 7 장	결 론	-	 	92
참고문헌	• • • • • • • • •		 	94

## A Study on the Integrated Control of Ship Motion Based on Joystick Control

Byung-Hun Choi

Department of Control & Instrumentation Engineering, Graduate School, Korea Maritime University

#### ABSTRACT

# ARITIMEUN

This paper suggests a new integrated control system of ship to be able to generate arbitrary maneuvering motions using multi-actuators as shown in the below figure.



The concept of the suggested integrated control system of ship is to

compute the controlled thrusts of main axes of ship motion in the present sampling time and to allocate the computed thrusts to actuators equipped in ship, in order to asymptotically follow the desired ship motion commanded by operator.

In order to implement the suggested control system, several algorithms must be developed, such as a joystick command input algorithm, an input identification algorithm for command motions, a reference input generation algorithm for motion variables, a computation algorithm for controlled accelerations, a controlled thrust generation algorithm for main axes of ship motion, and a thrust allocation algorithm for actuators.

In this paper, all algorithms to comprise the suggested control system were developed based on the velocity kinematics of rigid body, ship dynamics, and control theories. And also, a simulator was implemented using a real joystick device for command input and MATLAB SIMULINK program for developing several softwares including a ship model under consideration.

Several simulations were executed to verify the possibility of the integrated control philosophy and to assure the control performance of the suggested control system. At first, two simulations for basic ship maneuvering motion corresponding to a pure translation and a pure rotation were executed. From the simulation results, it could be found that the resultant heading angle was changed for the pure translation and the axis of rotation center was shifted for the pure rotation. In order to eliminate the resultant errors, the suggested integrated control system was compensated by adding an controlled acceleration computation algorithm and the same simulations were executed. Three simulations, at last, were executed by comprising scenarios for arbitrary ship motion commands in the sequence of translations and rotations. From simulation results, the possibility and the control performance of the suggested integrated control system of ship were assured qualitatively.

#### List of Figures

- Fig. 1.1 A ship with Multi-actuators considered in this paper
- Fig. 1.2 A configuration of the integrated control system of the ship based on joystick control
- Fig. 2.1 Motion variables for marine vessel
- Fig. 2.2 Transverse metacentric stability
- Fig. 3.1 A schematic diagram for identifying operator's command
- Fig. 3.2 An identification algorithm of operator's command
- Fig. 3.3 A velocity profile for mode 1 when  $|V_{ref}| = v_{max}$
- Fig. 3.4 A velocity profile for mode 2 when  $|v| = v_{\rm max}$
- Fig. 3.5 A velocity profile for mode 2 when  $\left|V_{ref}\right|_{\rm max} = \left|V_{\rm max}\right|$
- Fig. 3.6 A variable velocity profile for mode 4 according to  $\zeta$  when  $|V_{\rm max}|\!=\!v_{\rm max}$

Fig. 3.7 A variable velocity profile for mode 5 according to ζ
Fig. 3.8 A variable velocity profile for mode 6 according to ζ
Fig. 3.9 A motion analysis for rotation about bow center axis
Fig. 3.10 Motion decomposition of the rotation about bow center axis
Fig. 3.11 Motion decomposition of the rotation about gravity center axis
Fig. 3.12 A motion analysis for rotation about stern center axis
Fig. 3.13 Motion decomposition of the rotation about stern center axis
Fig. 4.1 An algorithm for computing required thrusts and a moment
Fig. 4.2 An algorithm for computing linear accelerations and an angular acceleration for asymptotically following reference inputs of command variables

Fig. 5.1 Ship actuators and attached positions under consideration Fig. 5.2 A flowchart of rudder angle command generation algorithm

- v -

- Fig. 6.1 A configuration of the integrated control system of the ship
- Fig. 6.2 An implemented simulator of the integrated control system
- Fig. 6.3 Simulator configuration using MATLAB SIMULINK
- Fig. 6.4 A joystick command input module
- Fig. 6.5 A reference input generation module for motion variables
- Fig. 6.6 A computation module for accelerations
- Fig. 6.7 A generation module of required thrusts
- Fig. 6.8 A thrust allocation module for actuators
- Fig. 6.9 An implementation of the ship model for simulation execution
- Fig. 6.10 Simulation result of the proposed integrated control system for translation in sway direction
- Fig. 6.11 Ship motion information for translation in sway direction
- Fig. 6.12 Allocated thrusts of actuators for translation in sway direction
- Fig. 6.13 Simulation result of the proposed integrated control system for pure rotation about the axis through bow center
- Fig. 6.14 Motion information for rotation about the axis through bow center
- Fig. 6.15 Allocated thrusts of actuators for pure rotation about the axis through bore center
- Fig. 6.16 Error compensation algorithm through negative feedback of acceleration and angular acceleration of ship
- Fig. 6.17 A configuration of the compensated integrated control system of the ship based on joystick control
- Fig. 6.18 Simulation result of the compensated integrated control system for translation in sway direction
- Fig. 6.19 Ship motion information for translation in sway direction using the compensated algorithm
- Fig. 6.20 Allocated thrusts of actuators for translation in sway direction using the compensated algorithm
- Fig. 6.21 Simulation result of the compensated integrated control system for pure rotation about the axis through bow center

- Fig. 6.22 Motion information for rotation about the axis through bow center using the compensated integrated control system
- Fig. 6.23 Allocated thrusts of actuators for pure rotation about the axis through bore center using the compensated integrated control system
- Fig. 6.24 Simulation result of ship motion for scenario 1
- Fig. 6.25 Ship motion information occurred under scenario 1
- Fig. 6.26 Thrusts of actuators generated under scenario 1
- Fig. 6.27 Simulation result of ship motion for scenario 2
- Fig. 6.28 Ship motion information occurred under scenario 2
- Fig. 6.29 Thrusts of actuators generated under scenario  $2\,$
- Fig. 6.30 Simulation result of ship motion for scenario 3
- Fig. 6.31 Ship motion information occurred under scenario 3
- Fig. 6.32 Thrusts of actuators generated under scenario 3



#### List of Tables

- Table 2.1 The notation of SNAME for marine vessel
- Table 3.1 Input variables and computation equations for mode 1
- Table 3.2 Input variables and computation equations for mode 2
- Table 3.3 Input variables and computation equations for mode 3
- Table 3.4 Input variables and computation equations for mode 4
- Table 3.5 Input variables and computation equations for mode 5
- Table 3.6 Input variables and computation equations for mode 6
- Table 3.7 Explanation of terminologies in mode 7
- Table 3.8 Input variables and computation equations for mode 7
- Table 3.9 Explanation of terminologies in mode 8
- Table 3.10 Input variables and computation equations for mode 8 Table 3.11 Explanation of terminologies in mode 9
- Table 3.12 Input variables and computation equations for mode 9
- Table 5.1 Definition of attached positions of actuators
- Table 6.1 Principal dimensions of ship
- Table 6.2 Hydrodynamic derivatives and constants from ship dimension

#### 제1장 서론

#### 1.1 연구 배경

선박 운항의 주요한 목적은 항해 중 발생할 수 있는 좌초, 침몰, 충돌로부터 선박의 안전성을 확보하는 문제와 정해진 항로를 정확하게 추종하는 문제로 요 약할 수 있다. 정확한 항로 추종은 운항 중 추진 에너지의 손실을 최소화하고 최단시간에 목적지에 도달하는 것을 목표로 한다. 다양한 종류와 목적을 가진 특수선이 개발됨에 따라 회두각의 유지 및 변침(일반적인 오토파일럿), 전자해 도를 이용한 변침점(항로) 추종제어, 자동 접·이안 시스템, 동적 위치유지 시 스템(Dynamic positioning system) 등과 같은 다양한 기능을 갖는 항법유도제 어 시스템에 관한 연구가 진행되고 있다[1~3]. 최근 해상교통이 복잡해지고 선 박이 대형화, 고속화됨에 따라 선박항해의 안정성 문제가 더 없이 중요한 이슈 로 대두됨으로써 선박의 추진성능을 향상시킬 목적으로 고도의 선박의 조종능 력을 구비한 다양한 선종이 출현되고 있다. 특히 대형선박이 좁은 항구에서 출 입항 할 때와 적하작업을 위하여 안벽으로 접·이안 할 때에는, 터그보트의 보 조적인 도움뿐만 아니라 경우에 따라서는 선박 자체의 선수와 선미에 Side thruster 등 추력장치를 설치하여 능동적인 조종운동을 갖도록 함으로써 선박 스스로 운항안정성을 담보하도록 하는 노력이 진행되고 있다[4~7].

한편, 해저 광케이블 포설선이나 해저탐사선, 다이버용 선박, 피싱용 레저선 박, 크루즈 여객선 등은 그 목적에 따라 다양한 선박운동을 필요로 한다. 이를 위해서는 오퍼레이터에 의해 명령되는 특수한 조종입력 장치와 다양한 형태의 추력장치를 선박에 설치하여야 하며, 이들을 통합하여 선박이 원하는 운동을 갖도록 제어해야 하는 선박운동 통합제어시스템 구성이 필요하다. 그러나 이에 대한 연구는 특수선박을 건조하여 보급하고 있는 외국 선진업체들 중심으로 이 루어지고 있으며 거의 공개되고 있지 않은 실정이다[8].

따라서 일반적인 대양 항해처럼 고속운동이 아닌 다양한 저속 조종운동을 대 상으로 하며 이미 개발되어 있는 자동 접·이안 조종제어, 동적 위치유지 조종 제어 등으로도 확장 가능한 새로운 개념의 선박 통합제어시스템에 대한 전체적 인 개념을 정립하는 것이 필요하고, 조종명령의 입력에서부터 선박운동의 재현 까지 요구되는 구체적 모듈 개발에 대한 연구를 수행하는 것이 필요하다.

#### 1.2 연구 내용

본 논문에서 연구하는 선박 통합제어시스템의 개념은, 현재 이 시간에서 원 하는 선박운동을 갖도록 하기 위해 선박의 해당 축 방향에 대한 추력과 모멘트 를 구한 다음, 이를 설치된 다추력장치(Multi-actuators)에 적절하게 할당함으 로써 각각의 축 방향에서 선박운동을 발생시키도록 하며, 발생된 선박운동이 원하는 운동이 될 때까지 발생된 선박의 운동정보를 피드백하여 제어하는 형태 이다. 선박 통합제어시스템을 위하여 본 논문에서 연구대상으로 하는 선박모델 은 그림 1.1과 같이 추진을 위하여 CPP(Controllable pitch propeller) 2대가 좌우 대칭으로 선미에 설치되어 있고, 회전과 이동 등 다양한 운동을 재현하기 위하여 선수와 선미측에 각각 Side thruster가 2대씩 설치된 다추력장치를 가 진 선박을 대상으로 하다[8].



그림 1.1 본 논문에서 고려하는 다추력장치를 가진 선박 Fig. 1.1 A ship with Multi-actuators considered in this paper 이 때 선박의 조종운동을 위하여 오퍼레이터에 의해 조작되는 명령입력장치로 는 이동명령을 위한 조이스틱(Joystick)과 선회명령을 위한 조그 다이얼(Jog dial)을 사용한다고 가정한다.

그림 1.2는 본 논문에서 제안하는 선박 통합제어시스템 개념의 구성도를 보 여주는 그림이다.

그림 1.2에서 제안하는 선박 통합제어시스템을 구성하기 위해서는 다음과 같은 모듈과 알고리즘이 구성되어야 한다.

첫째, 오퍼레이터의 조작에 의해 선박운동 명령을 내리기 위한 조이스틱 컨 트롤 기반의 명령입력 모듈이 필요하다.

둘째, 오퍼레이터의 조작에 의해 내려지는 선박운동 명령이 무엇인지를 인식 하기 위한 조작명령 인식알고리즘이 필요하다.

셋째, 인식된 선박운동을 토대로 명령받은 선박운동을 재현하는데 필요한 선 박운동 변수를 정의하고 기준 값을 계산하여야 한다.

넷째, 선박의 운동 축별로 요구되는 추력과 추력모멘트를 계산하기 위하여



그림 1.2 조이스틱 컨트롤 기반 선박 통합제어시스템 구성도 Fig. 1.2 A configuration of the integrated control system of the ship based on joystick control 요구되는 선가속도와 각가속도를 계산하는 알고리즘이 필요하다.

다섯째, 현재 발생된 선박운동변수 정보와 계산된 선가속도와 각가속도를 이 용하여 비선형 선박운동방정식으로부터 각 축별로 요구되는 추력과 추력모멘트 를 계산하는 알고리즘이 구성되어야 한다.

여섯째, 선박 운동 축별로 계산된 추력과 추력모멘트를 원하는 선박운동이 재현되도록 선박에 설치된 다추력장치에 적절히 할당하는 추력할당알고리즘이 필요하다.

따라서 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대상선박이 저속 조종운동 을 한다는 가정 하에 조이스틱 컨트롤 기반 통합제어시스템의 요구추력 및 모 멘트 계산알고리즘에서 필요로 하는 3자유도 비선형 선박운동방정식을 유도한 다. 3장에서는 오퍼레이터 입력모듈에서 조이스틱과 조그 다이얼을 이용하여 오퍼레이터가 선박의 조종운동 명령을 내리면 그 명령이 어떤 운동명령인지를 인식하는 명령인식알고리즘을 구성하다. 또한 명령인식알고리즘에서 인식한 선 박운동을 발생시키기 위하여 필요한 운동 축의 운동변수를 정의하고 그 운동변 수의 명령입력 기준 값을 생성하는 알고리즘에 대하여 전개한다. 이 알고리즘 에서는 조이스틱에 의한 이동명령이 내려질 경우에는 조이스틱 경사방향에 따 른 선박의 이동방향을 결정하고, 조이스틱의 기울기 값을 활용하여 선박의 이 동속도의 크기를 설정한다. 조그 다이얼에 의한 선회명령이 내려질 경우에는 선수중심 선회, 무게중심 선회, 선미중심 선회인지에 따라 현재의 선박 회두각 정보를 활용하여 선박이 추가적으로 선회해야 할 회두각 기준 값을 결정하고, 선회중심의 이동 없이 선회만 하도록 보상해 주는 운동축의 운동변수 기준 값 을 계산한다. 4장에서는 오퍼레이터 조작명령에 대응하는 선박운동을 실현할 목적으로 선박 고정좌표계의 3자유도 운동 축에 따른 요구추력과 추력모멘트를 계산하는 요구추력 생성알고리즘을 유도한다. 이 때 3자유도 비선형 운동방정 식을 이용하며 요구추력과 요구추력 모멘트는 현재 선박의 운동으로 인해 발생 되는 선체주변의 유체에 의한 유체관성력과 유체점성력을 극복함과 동시에 원 하는 운동을 발생시키기 위하여 운동 축별로 선박이 가져야 하는 요구되는 선 가속도 및 각가속도를 가지도록 계산되어야 한다. 따라서 4장에서는 요구되는 선가속도 및 각가속도 계산알고리즘에 대해서도 설명한다. 5장에서는 선박의 3 자유도 운동 축별로 계산된 요구추력과 추력모멘트를 통합적으로 발생시키기

위하여 현재 활성화된 선박의 다추력장치들을 고려하여 추력과 추력모멘트를 할당하는 알고리즘의 유도에 관해서 설명한다. 6장에서는 조이스틱과 조그 다 이얼 기반의 통합제어시스템 시뮬레이터 구성에 관하여 전개한다. 명령입력모 듈인 조이스틱과 조그 다이얼은 실물을 사용하며 대상선박은 3자유도로 모델링 된 컴퓨터상의 수학모델을 MATLAB의 SIMULINK를 사용하여 구성한 것으로 대체 한다. 그 외 각종 알고리즘은 MATLAB 언어를 사용하여 구현한다. 선박 통합제 어시스템의 타당성을 검증하기 위하여 실시하는 시뮬레이션은 3장에서 정의하 는 선박의 운동명령 중에서 이동 및 회전에 대한 기본명령 수행에 대한 것을 먼저 실행함으로써 타당성 여부를 판단한다. 만약 원하는 성능이 표출되지 않 을 경우에는 그림2에서 제안하는 알고리즘을 부분적으로 보완한 다음, 다시 기 본명령에 대하여 수행하고 타당성을 재검증하고자 한다. 이후 기본운동이 연속 적으로 복합된 다양한 운동명령 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 수행함으로써 최종적으로 제안하는 통합제어알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다. 마지막으 로 7장에서는 시뮬레이션 결과를 토대로 제안하는 선박 통합제어시스템에 대한 결론을 내리고 보완사항 등을 포함한 향후의 연구방향에 대하여 전망한다.



#### 제 2 장 선박의 조종운동방정식

이 장에서는 선박운동을 묘사하는데 사용되는 여러 가지의 변수를 정의하고, 선 박의 강체운동과 유체동역학적인 특성을 고려한 일반적인 6차원 비선형 모델을 유도한 다음, 선박 통합제어시스템용으로 사용되는 저속 조종운동에서의 3차원 비선형 운동방정식을 유도한다.

#### 2.1 선박운동 좌표계와 운동변수의 정의

선박 운동에 관련된 좌표계와 변수를 그림 2.1 과 표 2.1 에 각각 나타낸다.  $x_b y_b z_b$ 좌표계는 원점이 선박상의 어떤 위치에 고정되어 선박과 함께 움직이는 운동 좌표계로 선박운동의 주요 변수를 묘사하는데 사용된다. X, Y, Z는 각각  $x_b, y_b, z_b$ 방향에 대한 힘을 나타내고, K, M, N은  $x_b, y_b, z_b$  축에 대한 모멘트를 나타내며,  $u, v, w = x_b, y_b, z_b$ 방향에 대한 선속도,  $p, q, r = x_b, y_b, z_b$ 축에 대한 각속도를 나 타낸다. x, y, z와  $\phi, \theta, \psi$ 는 각각  $x_b, y_b, z_b$ 축의 위치와 각도이다[9~12].



그림 2.1 선박 운동을 묘사하기 위한 변수 Fig. 2.1 Motion variables for marine vessel

표 2.1 선박 운동을 묘사하기 위해 사용하는 변수

тос	초 은도바햐	힘과	선속도 및	위치 및
지규工		모멘트	각속도	오일러각
1	$x_b$ 축 방향 선운동(surge)	X	u	x
2	$y_b$ 축 방향 선운동(sway)	Y	v	y
3	$z_b$ 축 방향 선운동(heave)	Ζ	w	z
4	$x_b$ 축에 관한 회전운동(roll)	K	p	$\phi$
5	$y_b$ 축에 관한 회전운동(pitch)	M	q	heta
6	$z_b$ 축에 관한 회전운동(yaw)	N	r	$\psi$

Table 2.1 The notation of SNAME for marine vessel

# 2.2 선박의 일반적인 6자유도 운동방정식

뉴턴 역학과 오일러 정리를 선박 선체에 적용한 6차원 강체 운동방정식의 결과 를 SNAME 스칼라 형태로 표현하면 다음 식 (2.1)~(2.6)과 같다[9~12].

SURGE

$$\overline{m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})]} = X$$
(2.1)

$$\frac{SWAY}{m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})]} = Y$$
(2.2)

$$\frac{\text{HEAVE}}{m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})]} = Z$$
(2.3)

$$\begin{array}{l} \underline{\text{ROLL}} \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr - (\dot{r} + pq) I_{xz} + (r^2 - q^2) I_{yz} + (pr - \dot{q}) I_{xy} \\ + m [y_G (\dot{w} - uq + vp) - z_G (\dot{v} - wp + ur) - x_G z_G (pq + \dot{r})] = K \end{array}$$

$$(2.4)$$

$$\begin{array}{l} \underline{\text{PITCH}} \\ I_{y}\dot{q} + (I_{x} - I_{z})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^{2} - r^{2})I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ &+ m[z_{G}(\dot{u} - vr + wq) - x_{G}(\dot{w} - uq + vp) + x_{G}z_{G}(p^{2} - r^{2})] = M \end{array}$$

$$(2.5)$$

$$\begin{split} \frac{\underline{\mathbf{YAW}}}{I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq - (\dot{q} + rp) I_{yz} + (q^2 - p^2) I_{xy} + (rq - \dot{p}) I_{zx} \\ &+ m [x_G (\dot{v} - wp + ur) - y_G (\dot{u} - vr + wq) + x_G z_G (qr - \dot{p})] = N \end{split}$$

. . . . ...

여기에서,  $I_x, I_y, I_z$ 와  $I_{xy} = I_{yx}$ ,  $I_{xz} = I_{zx}$ ,  $I_{yz} = I_{zy}$ 는 (2.7)과 같이 정의되는 선체고정좌표계의 원점에 대한 관성행렬  $I_o$ 의 요소이다.

$$I_{o} := \begin{bmatrix} I_{x} & -I_{xy} - I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{y} & -I_{yz} \\ -I_{zx} - I_{zy} & I_{z} \end{bmatrix}, \quad I_{o} = I_{o}^{T} > 0$$
(2.7)

 $I_x, I_y, I_z$ 는 각각 선체고정좌표계  $x_b, y_b, z_b$ 축에 대한 회전 관성모멘트이고,  $I_{xy} = I_{yx}$ ,  $I_{xz} = I_{zx}$ ,  $I_{yz} = I_{zy}$ 는 관성적이다.

### 2.2.1 선체고정좌표계의 원점을 $y_G = 0$ 상에 둘 경우 강체운동방정식 (선박 좌우 대칭)

선박 선체의 강체 운동방정식은 식 (2.1)~(2.6)에서 선박운동체가  $x_b z_b$ - 평면에 대하여 좌우 대칭이므로  $y_G = 0$ 이 되고, 또 무게중심을 지나고 선체고정좌표계 의 세 축  $x_b, y_b, z_b$ 에 평행한 관성주축에 관하여 질량관성모멘트를 나타낼 경우 크로스적(Cross product)은  $I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$ 이 된다. 따라서 이들을 대입하고 정리하면 식 (2.8)~(2.13)과 같이 간략화 된 선체의 6자유도 강체 운동방정식을 얻을 수 있다[9~12].

$$\frac{\text{SURGE}}{m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})]} = X$$
(2.8)

$$\frac{\text{SWAY}}{m[\dot{v}-wp+ur+z_G(qr-\dot{p})+x_G(pq+\dot{r})]} = Y$$
(2.9)

$$\frac{\text{HEAVE}}{m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pr - \dot{q})]} = Z$$
(2.10)

$$\frac{\text{ROLL}}{I_x \dot{p}} + (I_z - I_y)qr - mz_G[(\dot{v} - wp + ur) + x_G z_G(pq + \dot{r})] = K$$

$$(2.11)$$

$$\frac{\text{PITCH}}{I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp) + x_G z_G(p^2 - r^2)] = M$$
(2.12)

$$\underbrace{\underline{YAW}}_{I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq+m[x_G(\dot{v}-wp+ur)+x_Gz_G(qr-\dot{p})]} = N$$

$$(2.13)$$

선체가 수상에서 운동할 때 선체에 작용하는 외력과 모멘트는 선체 주위 유체 의 흐름과 부가물이나 인위적인 제어타력에 의해 여러 형태의 힘과 모멘트를 받고 있고 구성요소별로 정리하면 다음 식 (2.14),(2.15)와 같다[12].

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_I + \boldsymbol{F}_D + \boldsymbol{F}_S + \boldsymbol{F}_C \tag{2.14}$$

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{I} + \boldsymbol{M}_{D} + \boldsymbol{M}_{S} + \boldsymbol{M}_{C} \tag{2.15}$$

이 때  $F = [X \ Y \ Z]^T$ ,  $M = [K \ M \ N]^T$ 를 나타내고, 여기서 사용된 첨자 I, D, S, C 는 각각 유체관성력과 모멘트, 점성감쇠유체력과 모멘트, 유체정역 학적 힘과 모멘트, 제어유체력과 모멘트 항을 각각 의미한다. 또한  $F_C$  및  $M_C$  성분은 추력장치와 부가물, 제어판 등에 의해 결정되는 외력 및 모멘트의 요소로서 선체의 구체적인 형상과 제원이 정해져야 결정될 수 있다.

#### 2.2.2 유체동역학적 힘과 모멘트

선박운동체가 수중에서 운동할 때 선체주변의 유체흐름 때문에 발생하는 유체 동역학 힘과 모멘트는 유체관성력과 모멘트, 점성감쇠유체력과 모멘트로 나눌 수 있다. 이들을 간략히 정리하면 다음과 같다[11~12].

#### 1) 유체관성력 $F_I$ 와 모멘트 $M_I$

유체관성력과 모멘트(또는 부가질량과 부가관성모멘트)는 유체동역학 계수의 항으로 계산되며 다음 식 (2.16),(2.17)과 같이 표현된다[9,12].

$$F_{j} = -\sum_{i=1}^{i=6} (\dot{U}_{i}A_{ji} + \epsilon_{jkl}U_{i}\Omega_{k}A_{li})$$
(2.16)

$$M_{j} = -\sum_{i=1}^{i=6} (\dot{U}_{i}A_{j+3,i} + \epsilon_{jkl}U_{i}\Omega_{k}A_{l+3,i} + \epsilon_{jkl}U_{i}U_{k}A_{li}$$
(2.17)

여기서,

 $F_j$  : j축 방향의 힘

M<sub>i</sub> : *j*축 주위의 모멘트

 $A_{ji}: i$ 축 방향 운동모드에 기인하는 j축 방향 부가질량 또는 부가관성 모멘트,

 $(U_1, U_2, U_3) \equiv (u, v, w), (U_4, U_5, U_6) \equiv (p, q, r), (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3) \equiv (p, q, r)$ 이고, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, j, k, l = 1, 2, 3이며,  $\epsilon_{jkl}$ 은 부호변환기로서 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{jkl} = \begin{cases} +1, \text{ for } jkl = 123, 231, \\ -1, \text{ for } jkl = 132, 213, 321 \\ 0, otherwise \end{cases}$$

부가질량과 부가관성모멘트의 다른 표현으로는 예를 들어 x축 방향의 가속도

 $\dot{u}$ 에 기인하는 y축에 대한 부가관성력을 유체력 미계수를 사용하여  $A_{21}=-Y_{u}$ 로 표현하기도 한다. 여기서 유체력 미계수 Y<sub>u</sub>은 다음과 같이 정의된다.

$$Y_{\dot{u}} = \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}} \tag{2.18}$$

(2.16), (2.17)로 주어지는 유체관성력과 모멘트 관련 식을 선박에 적용하기 위하여 구체적으로 전개하고 축들 즉, 운동변수들 사이에 영향을 미치지 않는 비연성(Uncoupled) 항들을 제거하여 표현하면 다음 식 (2.19)~(2.24)와 같이 정리될 수 있다.

$$X_{I} = -\dot{u}A_{11} - \dot{q}A_{15} + vrA_{22} + prA_{24} + r^{2}A_{26} - wqA_{33} - q^{2}A_{35}$$
(2.19)

$$Y_{I} = -\dot{v}A_{22} - \dot{p}A_{24} - \dot{r}A_{26} + wpA_{33} + pqA_{35} - qrA_{15}$$
(2.20)

$$Z_{I} = -\dot{w}A_{33} - \dot{q}A_{35} - vpA_{22}vp - p^{2}A_{24} + q^{2}A_{15} - prA_{26}$$
(2.21)

$$K_{I} = -\dot{v}A_{42} - \dot{p}A_{44} - \dot{r}A_{46} + wpA_{24} - pqA_{64} + qr(A_{55} - A_{66}) - vq(A_{62} + A_{35})$$
(2.22)

$$M_{I} = -\dot{u}A_{51} - \dot{w}A_{53} - \dot{q}A_{55} - wqA_{15} - vrA_{42} + vpA_{62} - r^{2}A_{46} + p^{2}A_{64} + pr(A_{66} - A_{44})$$

$$(2.23)$$

$$M_{I} = -\dot{v}A_{62} - \dot{p}A_{64} - \dot{r}A_{66} - wpA_{53} + qrA_{46} + pq(A_{44} - A_{55})$$

$$\begin{split} N_{I} &= - v A_{62} - p A_{64} - r A_{66} - w p A_{53} + q r A_{46} + p q (A_{44} - A_{55}) \\ &- u p (A_{51} + A_{24}) + v q (A_{15} + A_{42}) \end{split}$$

#### 2) 점성감쇠유체력 $F_D$ 와 모멘트 $M_D$

유체의 점성으로 인해 발생하는 점성감쇠유체력은 일반적으로 실험을 통하여 구하게 된다. 대부분의 경우 선체의 형상이 좌우 대칭임을 고려한다면 점성감 쇠유체력은 식 (2.25), 점성감쇠유체모멘트는 (2.26)과 같이 표현될 수 있다 [9,12].

$$X_{D} = X_{uu}u^{2} + X_{NL}(v,w)$$

$$Y_{D} = Y_{v}v + Y_{r}r + Y_{NL}(v,r)$$

$$Z_{D} = Z_{uu}u^{2} + Z_{w}w + Z_{q}q + Z_{NL}(w,q)$$
(2.25)

$$K_{D} = K_{p} p + K_{v} v + K_{r} r$$

$$M_{D} = M_{uu} u^{2} + M_{w} w + M_{q} q + M_{NL}(w,q) \qquad (2.26)$$

$$N_{D} = N_{v} v + N_{r} r + N_{NL}(v,r)$$

여기서,

$$\begin{split} X_{NL}(v,w) &= X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2 \\ Y_{NL}(v,r) &= Y_{v|v|}v |v| + Y_{r|r|}r |r| + Y_{v|r|}v |r| \\ Z_{NL}(w,q) &= Z_{w|w|}w |w| + Z_{q|q|}q |q| + Z_{w|q|}w |q| \\ M_{NL}(w,q) &= M_{w|w|}w |w| + M_{q|q|}q |q| + M_{q|w|}q |w| \\ N_{NL}(v,r) &= N_{v|v|}v |v| + N_{r|r|}r |r| + N_{r|v|}r |v| \end{split}$$
(2.27)

로 표현되는 점성감쇠유체력 및 모멘트 요소는 운동변수들에 관해 2차로 표현 되는 항들이다. 위의 표현에서  $X_{uu}$ 는 선박운동체가 정상 직진할 때 선박운동 체에 작용하는 저항계수를 나타내며,  $Z_{uu}$ 와  $M_{uu}$ 는 정상 직진할 때 선박운동체 동체의 상하 비대칭 형상 때문에 양력을 발생시키는 성분의 유체력 미계수로서 이라고 가정해도 무방하다.

#### 2.2.3 복원력과 모멘트

질량과 감쇠력 외에 선박은 중력과 부력의 영향을 받는다. 유체정역학적 관점에 서, 중력과 부력을 복원력이라 부른다. 복원력은 선박의 크기와 형태, 메타센터 의 높이, 무게중심과 부력중심의 위치에 달려 있다[1~2,9].



Fig. 2.2 Transverse metacentric stability

따라서 전복되지 않고 안정한 선박의 조종운동에서는 고려하지 않아도 전혀 문 제되지 않는 힘이다.

$$X_{S} = -\rho g \int_{0}^{z} A_{wp}(\zeta) d\zeta \sin\theta \qquad (2.28)$$

$$Y_{S} = \rho g \int_{0}^{z} A_{wp}(\zeta) d\zeta \cos\theta \sin\phi$$

$$Z_{S} = \rho g \int_{0}^{z} A_{wp}(\zeta) d\zeta \cos\theta \cos\phi$$

$$K_{S} = \rho g \Delta \overline{GM_{T}} \sin\phi \cos\theta \cos\phi$$

$$M_{S} = \rho g \Delta \overline{GM_{L}} \sin\theta \cos\theta \cos\phi$$

$$N_{S} = \rho g \Delta \overline{GM_{L}} \sin\theta \cos\phi \cos\phi$$

N<sub>S</sub> = ρg∇(-GM<sub>L</sub>-GM<sub>T</sub>)sinφsinθ 복원력과 모멘트는 식 (2.28)이 된다[12]. 여기서, ρ는 물의 밀도, g는 중력가 속도,  $A_{wp}(\zeta)$ 는 연직 방향 위치의 함수로 표현되는 선박의 수평면적, ▽는 배수 용적이다.

#### 2.2.4 제어유체력

선체가 유체 내에서 운동할 때 선체의 운동을 인위적으로 제어하기 위해서는 부가물과 추력장치를 사용한다. 이 때 선체에 작용하는 제어유체력은 추력장치 및 부가물의 종류와 부착위치, 사용개수에 따라 다르게 된다. 따라서  $F_C$  및  $M_C$  성분은 선박의 구체적인 형상이 정해져야 결정될 수 있으므로 일반적인 운동을 묘사하는 본 절에서는 논의하지 않기로 하고  $F_C = [X_{TC} \ Y_{TC} \ Z_{TC}]^T$ ,  $M_C = [K_{TC} \ M_{TC} \ N_{TC}]^T$ 로 나타내기로 한다.

#### 2.2.5 선박의 일반적인 6자유도 운동방정식 유도 결과

식 (2.8)~(2.13)으로 주어지는 선체의 강제운동방정식을 기초로 유체관성력 과 모멘트, 점성감쇠유체력과 모멘트, 제어유체력과 모멘트의 표현들을 각각의 축 운동에 대입하고 정리하면 선박의 일반 6자유도 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다. 이 때 유체의 정역학적 힘인 복원력과 복원모멘트는 선박의 자 세 안정도에 관련되는 것들이고 동역학적 운동특성에는 영향을 거의 미치지 않 으므로 생략해도 전혀 무리가 없기 때문에 여기서는 생략하였다.

SURGE

$$\begin{split} &(m+A_{11})\dot{u} + (m\,z_G + \,A_{15})\,\dot{q} \,=\, F_x \\ &(2\,.29) \\ &F_x = \,-\,(m+A_{33})wq + (m+A_{22})vr + (mx_G - A_{35})q^2 + (mx_G + A_{26})r^2 \\ &-\,(mz_G - A_{24})pr + X_{uu}\,u^2 + X_{vv}\,v^2 + X_{uv}w^2 + X_{TC} \end{split}$$

SWAY

 $(m+A_{22})\dot{v} - (mz_G - A_{24})\dot{p} + (mx_G + A_{26})\dot{r} = F_y$ (2.30)

$$\begin{split} F_y &= (m + A_{33}) \, w \, p - (m \, x_G - A_{35}) \, p q - (m \, z_G + A_{15}) \, q r \\ &+ Y_v v + (Y_r - m \, u) r + Y_{v|v|} v \, |v| + Y_{r|r|} r \, |r| + Y_{v|r|} v \, |r| + Y_{TC} \end{split}$$

$$\begin{split} & \underbrace{\text{HEAVE}}_{(m+A_{33})} \dot{w} - (m \, x_G - A_{35}) \dot{q} = F_z \\ & (2.31) \\ & F_z = -(m + A_{22}) v p + (m \, z_G - A_{24}) p^2 + (m \, z_G + A_{15}) q^2 - (m \, x_G + A_{26}) p r \\ & + Z_{uu} u^2 + Z_w w + (Z_q + m \, u) q + Z_{u|w|} w |w| + Z_{q|q|} q |q| + Z_{u|q|} w |q| + Z_{TC} \end{split}$$

$$\begin{array}{l} \hline \text{ROLL} \\ (I_x + A_{44}) \dot{p} - (m \, x_G z_G - A_{46}) \dot{r} - (m \, z_G - A_{42}) \dot{v} = M_x \\ (2.32) \\ M_x = - (m \, z_G - A_{24}) w \, p + (m \, x_G z_G - A_{64}) p q - [(I_z + A_{66}) - (I_y + A_{55})] q r \\ & - (A_{62} + A_{35}) v q + (A_{26} + A_{53}) w r - (A_{33} - A_{22}) v w + K_p p + K_v v \\ & + (K_r + m z_G u) \, r + K_{TC} \end{array}$$

$$\begin{split} M_y &= -\left(m\,z_G + A_{15}\right)qw + \left(m\,z_G - A_{42}\right)vr + \left(m\,x_G + A_{62}\right)vp \\ &+ \left(m\,x_G z_G - A_{46}\right)r^2 - \left(m\,x_G z_G - A_{64}\right)p^2 - \left[\left(I_x + A_{44}\right) - \left(I_z + A_{66}\right)\right]pr \\ &+ M_{uu}u^2 + M_ww + \left(M_q - mx_G u\right)q + M_{w|w|}w|w| + M_{d|q|}q|q| + M_{d|w|}q|w| + M_{TC} \end{split}$$

YAW

$$(I_z + A_{66})\dot{r} - (m x_G z_G - A_{64})\dot{p} + (m x_G + A_{62})\dot{v} = M_z$$
(2.34)

$$\begin{split} M_z &= (m\,x_G - A_{53})w\,p - (m\,x_G z_G - A_{46})qr - [(I_y + A_{55}) - (I_x + A_{44})]pq \\ &- (A_{51} + A_{24})up + (A_{15} + A_{42})vq + N_vv + (N_r - mx_Gu)\,r + N_{v|v|}v\,|v| \\ &+ N_{r|r|}r|r| + N_{r|v|}r\,|v| + N_{TC} \end{split}$$

#### 2.3 선박 통합제어시스템용 3자유도 운동방정식

#### 2.3.1 O-x<sub>b</sub>y<sub>b</sub> 평면 일반적인 3자유도 운동방정식

 $O-x_by_b$  평면운동은 선속도는  $U \equiv (u, v, 0)$ , 각속도는  $\Omega \equiv (0, 0, r)$ 이므 로 (2.29), (2.30), (2.34)로 부터 Surge, Sway, Yaw 운동만이 연성된 다음과 같은 3자유도 평면 운동방정식을 얻을 수 있다. 이 때 제어유체력에 대한 표현 은 선미에 추력장치로서 CPP가 있고 부가물로서 타가 있으며, 선수 및 선미측 에 추력장치로서 Side thruster가 장착되어 있다고 가정하고 제어추력 및 타력 에 대한 다음의 표현을 대입하도록 한다. 즉,

$$X_{TC} = X_{\delta\delta}\delta^{2} + X_{C}$$

$$Y_{TC} = Y_{\delta}\delta + Y_{C}$$

$$N_{TC} = N_{\delta}\delta + N_{C}$$
(2.35)
(2.36)
(2.37)

여기서  $X_C$ ,  $Y_C$  는 추력장치에 의한 추력이고,  $N_C$  는 추력장치에 의한 추력 모멘트이다. 또한 유체관성력에 대한 표현을 유체력 미계수를 사용하여 다음과 같이 구체적으로 표현하여 사용하기로 한다. 즉,

$$\begin{split} A_{11} =& -X_{u}, \\ A_{22} =& -Y_{v}, \\ A_{66} =& -N_{r}, \\ A_{26} =& A_{62} =& -Y_{r}. \end{split}$$

이 때 선박운동에 대한 3자유도 비선형 평면 운동방정식은 다음 식(2.38)

~(2.40)과 같이 정리된다.

SURGE

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} = (m - Y_{\dot{v}})vr + (mx_G - Y_{\dot{r}})r^2 + X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{u|u|}u|u| + X_C$$
(2.38)

<u>SWAY</u>

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_v v + (Y_r - m u)r$$

$$+ Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|r|}r|r| + Y_{v|r|}v|r| + Y_{\delta}\delta + Y_C$$

$$(2.39)$$

YAW

$$(I_{z} - N_{\dot{r}})\dot{r} + (m x_{G} - Y_{\dot{r}})\dot{v} = N_{v}v + (N_{r} - m x_{G}u)r + N_{v|v|}v|v| + N_{r|r|}r|r| + N_{r|v|}r|v| + N_{\delta}\delta + N_{C}$$

$$(2.40)$$

#### 2.3.2 고속에서 발생하는 비선형 감쇠항의 무시

선박이 조종운동을 할 때처럼 저속으로 운동할 때에는 고속운동에서 발생하는 비선형 2차 감쇠항들을 무시할 수 있다. 이 때 3자유도 비선형 운동방정식은 식 (2.41)~(2.43)과 같이 간략화 된다.

SURGE

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} = (m - Y_{\dot{v}})vr + (mx_G - Y_{\dot{r}})r^2 + X_C$$
(2.41)

<u>SWAY</u>

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_v v + (Y_r - m u)r + Y_\delta \delta + Y_C$$
(2.42)

YAW

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{v} = N_v v + (N_r - m x_G u)r + N_\delta \delta + N_C$$
(2.43)

2.3.3 선박통합제어시스템에서 요구되는 추력과 추력모멘트에 대한 계산식 선박 통합제어시스템과 같이 저속 조종운동에서 Y<sub>r</sub> ≈ 0로 근사가능하고 무게중 심에 선체고정좌표계의 원점을 두면 x<sub>G</sub>=0이므로 식 (2.41)~(2.43)은 다음과 같 이 간략화 되어 표현된다.

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} = (m - Y_{\dot{v}})vr + X_{C}$$

$$(2.44) \quad (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_{v}v + (Y_{r} - mu)r + Y_{\delta}\delta + Y_{C}$$

$$(2.45)$$

$$(I_{z} - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_{v}v + N_{r}r + N_{\delta}\delta + N_{C}$$

$$(2.46)$$

한편, 선박 통합제어시스템에서는 운동 축에 대한 운동변수의 기준 명령 값을 갖 도록 제어하기 위하여 추력장치가 발생시켜야 할 요구추력과 요구추력모멘트  $X_C, Y_C, N_C$ 를 구하는 것이 필요하다. 따라서 상기의 식 (2.44)~(2.46)을  $X_C, Y_C, N_C$ 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$X_{C} = (m - X_{\dot{u}})\dot{u} - (m - Y_{\dot{v}})vr$$
(2.47)
$$Y_{C} = (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{v}v - (Y_{r} - mu)r - Y_{\delta}\delta$$
(2.48)
$$N_{C} = (I_{z} - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_{v}v - N_{r}r - N_{\delta}\delta$$
(2.49)

식 (2.47)~(2.49)을 Iteration을 위한 알고리즘의 형태로 변형하면 다음 식 (2.50)~(2.52)와 같다.

$$X_{C}(n+1) = (m - X_{u}^{\cdot})\dot{u}(n) - (m - Y_{v}^{\cdot})v(n)r(n)$$
(2.50)

$$Y_{C}(n+1) = (m - Y_{v})\dot{v}(n) - Y_{v}v(n) - (Y_{r} - mu(n))r(n) - Y_{\delta}\delta(n)$$
(2.51)

$$N_{C}(n+1) = (I_{z} - N_{\dot{r}})\dot{r}(n) - N_{v}v(n) - N_{r}r(n) - N_{\delta}\delta(n)$$
(2.52)

여기서 선박으로부터 측정되어야 하는 정보는 u(n), v(n), r(n)에 해당하는 샘 플링시간  $nT_s$ 에서의 선속도 및 각속도와, 샘플링시간  $nT_s$ 에서의 Rudder 구동 각  $\delta(n)$ 이다.  $\dot{u}(n), \dot{v}(n), \dot{r}(n)$ 은, 선박 통합제어시스템에서 오퍼레이터 명령 에 따라 설정된 선박이 가져야 하는 운동변수 기준 값들을 추종하기 위해 선박 이 현재의 샘플링시간  $nT_s$ 에서 가속되어야 하는, 요구되는 선가속도와 각가속 도로서 계산식은 후에 설명하기로 한다. 나머지 상수들은 유체력 미계수들로서 선체요목으로부터 구할 수 있다.

### 제 3 장 오퍼레이터 조작명령 인식과 명령변수 기준 값 생성

#### 3.1 오퍼레이터 조작명령의 정의

그림 3.1은 오퍼레이터에 의하여 조작되는 선박운동 명령이 내려질 때 그 명 령이 어떤 선박운동 명령인가를 인식하기 위한 체계를 나타낸 것이다[8].



그림 3.1 오퍼레이터 조작명령 인식을 위한 구성도 Fig. 3.1 A schematic diagram for identifying operator's command

#### 3.1.1 조이스틱에 의한 이동명령의 정의

#### 1) 설정속도 모드

설정속도 모드는 선박이 선회하지 않고 현재의 회두각(선수방향)을 유지한 채 이동할 때 이동명령 입력 수단인 조이스틱의 기울기 크기에 상관없이 조이스틱 의 경사각에 따라 선박의 이동방향만 결정하는 것으로 정의한다. 선박의 이동 속도 크기를 설정함에 있어, 횡방향의 이동은 Side thruster에 의해서만 이루 어지기 때문에 이동속도를 크게 하는 것이 매우 제한적이다. 그 이유는 횡방향 이동의 경우는 선박 주변의 유체에 의한 부가관성이 선체 자체의 관성과 거의 같을 정도로 커 선박운동에 매우 큰 저항을 부가하는 반면, Side thruster의 추력용량을 크게 하는 것에는 한계가 있기 때문이다. 따라서 조이스틱에 의해 360° 방향으로 선박을 이동시키는 경우에는 설정속도의 최대크기를 다음 두 가 지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

(1) 조이스틱의 모든 방향에 있어서 설정 최대속력을 Side thruster의 최 대출력에 의해 발생시킬 수 있는 횡방향 최대속력으로 제한하는 경우  (2) 조이스틱의 방향에 따라, 설정 최대속력을 부분적으로 가변시키는 이 동방향 구간과, 최고속도의 크기를 제한하는 이동방향 구간으로 나누 는 경우

#### 2) 가변속도 모드

가변속도모드는 조이스틱의 경사각에 따라 선박의 이동방향을 결정하고 조이 스틱의 기울기 크기에 따라 이동속도의 크기를 조정하는 것으로 정의한다. 오 퍼레이터는 주어진 상황에 따라 선박의 이동속도 크기를 조정할 필요성을 느끼 게 되고, 이 때 조정할 수 있는 속도크기의 범위는 (1)의 설정모드에서 설정된 두 가지 경우의 크기 한도 내에서 조이스틱의 기울기에 따라 최소에서 최대까 지 가변될 수 있는 것으로 가정한다.

#### 3.1.2 조그 다이얼에 의한 선회명령의 정의

#### 1) 선수모드

선수모드는 선박의 선수위치는 이동되지 않고 선수를 중심으로 선박을 회전만 시키는 모드로 정의한다. 선박은 물 위에 떠 있으므로 선미에 부착된 Side thruster의 추력에 의해 회전 모멘트만을 인가하더라도 선수의 위치가 이동될 수 있기 때문에, 이를 방지하고 선수 회전중심을 고정시키기 위해서는 선박 운 동변수의 변화와 선박운동방정식에 근거한 운동역학적 관점에서 선수방향의 추 력과 선수에 부착된 Side thruster의 추력을 발생시켜 주는 알고리즘을 유도하 여야 한다.

#### 2) 중심모드

중심모드는 선박의 무게중심을 통과하는 회전축을 중심으로 선박을 회전시키 는 모드로 정의된다. 선박의 무게중심은 선박의 현재운동을 묘사할 목적으로 선박에 고정되어 선박과 함께 이동과 회전을 하도록 설정되는 좌표계의 원점이 된다. 선수 및 선미에 부착된 Side thruster가 발생시켜야 할 추력을 적절히 배분함으로써, 무게중심에 대한 선박의 선회는 무게중심의 이동 없이 발생시키 는 것이 가능하다.

#### 3) 선미모드

선미모드는 선박의 선미위치는 이동되지 않고 선미를 중심으로 선박을 회전만 시키는 모드로 정의된다. 선박은 물 위에 떠 있으므로 선수에 부착된 Side thruster의 추력에 의해서만 회전 모멘트를 인가하더라도 선미의 위치가 이동 될 수 있기 때문에, 이를 방지하기 위하여 선박운동 변수의 변화와 선박운동방 정식에 근거한 운동역학적 관점에서 선수방향의 추력과 선미에 부착된 Side thruster의 추력을 발생시켜 주는 알고리즘을 유도하여야 한다.

#### 3.2 명령인식 알고리즘과 명령입력 기준 값 생성 알고리즘

ARIME /

#### 3.2.1 오퍼레이터의 조작명령 인식 알고리즘

오퍼레이터가 조이스틱과 조그 다이얼을 조작하여 내리는 선박의 운동명령이 어떤 명령인지를 인식하여야만 대응되는 선박운동 명령변수 및 그 기준 값을 설정할 수 있게 된다. 따라서 조작명령에 따른 선박운동 인식모드를 결정하기 위한 알고리즘을 정립하여야 하고, 인식모드 하에서 그 때 활성화되어 있는 추 력장치 정보를 이용하여 명령된 선박운동 재현가능성 여부와 선박운동 명령변 수 기준 값을 결정하는 알고리즘이 정립될 수 있다.

그림 3.2는 본 논문에서 제안하는 오퍼레이터 조작명령을 받아 선박운동을 인식하고 인식된 운동에 대응되는 선박운동변수와 기준 값을 생성하기 위한 오 퍼레이터 명령 인식알고리즘을 전체적으로 나타낸 것이다.



그림 3.2 오퍼레이터 조작명령 인식 알고리즘

Fig. 3.2 An identification algorithm of operator's command

#### 3.2.2 조작명령 모드별 선박운동변수 명령입력 기준 값 생성알고리즘

1) 모드 1에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

그림 3.3은 일정속도 모드에서 선박 이동속도의 크기를 Side thruster에 의해 횡방향( $y_b$ 축 방향)으로 이동시킬 수 있는 최대속도의 크기로 자동 설정하는 모 드 1의 경우, 운동변수 명령 기준 값을 계산하기 위하여 설명한 그림이다.

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

그림 3.3  $|V_{ref}| = v_{max}$  인 모드 1에 대한 속도 프로파일 Fig. 3.3 A velocity profile for mode 1 when  $|V_{ref}| = v_{max}$ 

조이스틱 이동명령 즉 조이스틱의 경사방향 θ를 해독함으로써 모드 1에 대한 통합제어시스템의 명령입력으로 설정되어야 하는 운동변수와 그 기준 값 계산 식은 표 3.1과 같고, 이 때  $v_{max}$ 는 활성화되어 있는 추력장치 상태에 따라 구 체적으로 결정되어야 하는 횡방향 속도의 최대크기이다. 표 3.1 모드1의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식 Table 3.1 Input variables and computation equations for mode 1

명령입력 운동변수	선박이 가져야 할 운동변수 기준 값 계산식
$u_{ref}$	$u_{ref} = v_{\max} \sin  heta$
$v_{ref}$	$v_{ref} = v_{\max} \cos \theta$
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0$

#### 2) 모드 2에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

선박이 구간 ①과 ③의 조이스틱 경사방향 내에서 가변 설정속도로 이동할 경우 제어시스텎 명령입력 선박운동변수 기준 값을 결정하기 위하 속도 프로파 일은 그림 3.4와 같다. 이 때 조이스틱 경사방향 θ각의 구간 ①, ③에서 선박 이 가변속도의 크기를 가지고 이동하기 위한 통합제어시스템 명령입력용 선박 운동변수의 기준 값 계산식은 표 3.2와 같이 유도된다.

표 3.2 모드2의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식 Table 3.2 Input variables and computation equations for mode 2

경사방향 $ heta$ 구간	명령입력 운동변수	선박이 가져야 할 운동변수 기준 값 계산식
1) 또는 3)	$u_{ref}$	$u_{ref} = v_{ref}  an  heta$
	$v_{ref}$	945 $v_{ref} = sgn(\cos\theta) v_{max}$
	$\psi_{ref}$ Ø/	QF CAN $\psi_{ref} = \psi_0$

이를 구체적으로 설명하면 조이스틱 경사방향 θ에 대하여 횡방향 속도의 크기 가 우현방향 이동 즉  $sgn(\cos\theta) = +1$ 일 경우  $v = v_{max}$  로, 좌현방향 즉  $sgn(\cos\theta) = -1$ 일 경우  $v = -v_{max}$ 로 항상 먼저 결정된 후, 전진 또는 후진방향 의 속도는  $u_{ref} = v_{ref} \tan \theta$ 로 결정되고 최종적으로 무게중심의 이동속도의 크기  $|V_{\max}| = \sqrt{u_{ref}^2 + v_{ref}^2}$  에 의해 가변 설정속도의 크기는  $|V_{\max}|$  로 결정된다.

![](_page_35_Figure_0.jpeg)

그림 3.4  $|v|=v_{max}$  로 설정하는 경우 모드2에 대한 속도 프로파일 Fig. 3.4 A velocity profile for mode 2 when  $|v|=v_{max}$ 

#### 3) 모드 3에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

선박이 구간 ②와 ④의 조이스틱 경사방향 내에서 설정 최대속도로 이동할 경우 제어시스템 명령입력 선박운동변수 기준 값을 결정하기 위한 속도 프로파 일은 그림 3.5와 같다. 이 때 통합제어시스템 명령입력용 선박운동변수의 기준 값 계산식은 표 3.3과 같이 유도된다. 조이스틱 경사방향 θ각이 ②,④ 영역 내에 있을 경우에는 선박 이동속도의 최대크기가  $|V_{\text{max}}|$  = 상수로 항상 먼저 설정되며, 이 때 이동속도의 선수방향 성분과 횡방향 성분은  $|V_{\text{max}}|$  와 조이 스틱의 경사방향 θ에 의해 결정된다.

 $|V_{\text{max}}|$  를 설정하는 방법은, 모드2에서와 같이 횡방향 최대속도의 크기를  $|v_{ref}|_{\text{max}} = v_{\text{max}}$  로 설정한 후  $|u_{ref}|_{\text{max}} = |u_{\text{max}}| = |v_{\text{max}} \tan \theta|$  로 계산되는 선수 방향 이동 최대속도 크기를 조종운동에 대응하는 크기로 제한함으로써


표 3.3 모드3의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식 Table 3.3 Input variables and computation equations for mode 3

명령입력 운동변수	선박이 가져야 할 운동변수 기준 값 계산식
$u_{ref}$	$u_{ref}$ = $ V_{ m max} \sin heta$
$v_{ref}$	$v_{ref} =  V_{\rm max} \cos\theta$
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0$

여기서  $|u_{ref}|_{\max} = |v_{\max} \tan \theta|$ 의 크기제한은 현재 활성화된 CPP의 추력용량 범위 내에서 결정된다.

4) 모드 4에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘



그림 3.6  $|V_{\text{max}}| = v_{\text{max}}$  일 때  $\zeta$ 에 따른 모드4 가변속도 프로파일 Fig. 3.6 A variable velocity profile for mode 4 according to  $\zeta$ when  $|V_{\text{max}}| = v_{\text{max}}$ 

표 3.4 모드4의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식 Table 3.4 Input variables and computation equations for mode 4

명령입력 운동변수	선박이 가져야 할 운동변수 기준 값 계산식	
$u_{ref}$	$u_{ref} =  V_{ref}  \sin  heta$	
$v_{ref}$	$v_{ref} =  V_{ref}  \cos \theta$	
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0$	
$0 \leq \zeta \leq \zeta_{ ext{max}}$ 일 때 $\left V_{ref} ight $ 범위는 $0 \leq \left V_{ref} ight  \leq \left V_{ ext{max}} ight $		
$\left  V_{ref}  ight $ 를 $\zeta$ 에 비례하도록 설정기	아능. 즉, $\left V_{ref}\right  = \left V_{\max}\right \zeta$ $(0 \le \zeta \le \zeta_{\max})$	

그림 3.6과 같이 모든  $\theta$ 에 대하여 선박의 이동속도 최대크기는

 $|V_{\max}| = v_{\max}$  이며, 조이스틱 기울기 ζ에 따라 이동속도의 크기는  $0 \le |V_{ref}| \le |V_{\max}|$  범위를 가지고 ζ에 비례하는 가변속도 모드가 모드4이 다. 조이스틱 경사방향 θ와 조이스틱 기울기 ζ에 따른 선박이동을 위한 제어 시스템 명령입력용 선박운동변수의 기준 값 계산식은 표 3.4와 같이 유도된다.

#### 5) 모드 5에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

선박운동 명령모드 모드 5는 선박이 그림 3.7에서 보는 바와 같이 구간 ①과 ③의 조이스틱 경사방향 θ각내에서 조이스틱의 기울기 ζ에 따라 가변되는 속 도를 가질 경우이다. 이 때 선박운동변수 기준 값을 결정하기 위한 속도 프로 파일은 그림 3.7과 같고 선박 통합제어시스템 명령입력용 선박운동변수의 기준 값 계산식은 표 3.5와 같이 유도된다.

표 3.5 모드5의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식 Table 3.5 Input variables and computation equations for mode 5

명령입력 운동변수	선박이 가져야 할 운동변수 기준 값 계산식	
$u_{ref}$	$u_{ref} =  V_{ref} \sin heta$	
$v_{ref}$	$v_{ref} =  V_{ref}  \cos  heta$	
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref} = \psi_0$	
$0 \leq \zeta \leq \zeta_{ ext{max}}$ 일 때 $ig V_{ref}$ 범위는 $0 \leq ig V_{ref}ig  \leq ig V_{ ext{max}}ig $		
$\left  V_{ref}  ight $ 를 $\zeta$ 에 비례하도록 설정가	능. 즉, $\left V_{ref}\right  = \left V_{ ext{max}}\right \zeta$ ( $0 \leq \zeta \leq \zeta_{ ext{max}}$ )	

조이스틱 경사방향  $\theta$ 각에 대하여 횡방향 최대속도 크기가  $|v_{ref}|_{max} = v_{max}$ 로 먼저 결정되면,  $|u_{ref}|_{max} = |v_{max} \tan \theta|$ 로 결정되고 이 때 가변속도의 최대크 기는  $|V_{max}| = \sqrt{|u_{ref}|_{max}^2 + |v_{ref}|_{max}^2}$ 에 의해 결정된다. 동일한 조이스틱의 경사방향  $\theta$ 각에 대해서도 조이스틱의 기울기  $\zeta$ 가 달라지면 이동속도의 크기도 달라지며, 이 때 이동속도 크기의 범위는  $0 \le |V_{ref}| \le |V_{max}|$  이고,  $\zeta$ 에 비 례하도록  $|V_{ref}| = |V_{max}|\zeta$  를 설정할 수 있다.



그림 3.7  $\zeta$ 에 따른 모드5 운동변수 기준 값의 가변속도 프로파일 Fig. 3.7 A variable velocity profile for mode 5 according to  $\zeta$ 

## 6) 모드 6에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

선박이 구간 ②와 ④의 조이스틱 경사방향 θ각내에서 조이스틱의 기울기 ζ에 따라 가변되는 모드 6에 대한 선박운동변수 기준 값을 결정하기 위한 속도 프 로파일은 그림 3.8과 같다. 이 때 선박 통합제어시스템 명령입력용 선박운동변 수의 기준 값 계산식은 표 3.6과 같이 유도된다.

표 3.6 모드6의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식

Table 3.6 Input variables and computation equations for mode 6

명령입력 운동변수	선박이 가져야 할 운동변수 기준 값 계산식
$u_{ref}$	$u_{ref} =  V_{ref}  \sin  heta$
$v_{ref}$	$v_{ref} =  V_{ref}  \cos \theta$
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0$
$0 \leq \zeta \leq \zeta_{\max}$ 일 때 $ V_{ref} $	범위는 $0 \leq \left V_{ref} ight  \leq \left V_{ ext{max}} ight $
$\left V_{ref} ight $ 를 $\zeta$ 에 비례하도록 설정가능.	$ \vec{l} =  V_{ref}  =  V_{ ext{max}} \zeta \qquad (0 \leq \zeta \leq \zeta_{ ext{max}}) $



그림 3.8  $\zeta$ 에 따른 모드6 운동변수 기준 값의 가변속도 프로파일 Fig. 3.8 A variable velocity profile for mode 6 according to  $\zeta$ 

#### 7) 모드 7에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

선회명령에 대한 선수모드인 모드7은, 선수를 중심으로 선박이 회전만 하는 운동의 형태를 정의하는 것으로 회전중심이 되는 선수의 위치는 이동하지 않아 야 한다. 선수를 중심으로 회전하기 위해서는 선미 측에 부착된 Side thruster 에 의해서만 추력모멘트를 발생시켜 선박을 회전시켜야 하는데, 선박이 물 위 에 떠 있어 회전축이 고정되어 있지 않기 때문에 선미 측에 부착된 Side thruster만 동작시키더라도 선체 주변 유체의 운동으로 인해 선수 회전중심의 위치가 선수 및 횡방향으로 이동하게 된다. 선수 회전중심 축을 중심으로 선박 을 회전시키기 위하여, 선미 Side thruster의 추력만으로 선회시키려는 선박의 운동을 그림으로 나타내면, 그림 3.9와 같이 선박의 무게중심의 이동운동과 무 게중심 축에 대해 선회하는 회전운동이 동시에 일어나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는, 선수를 중심으로 회전시키기 위하여 선미 Side thruster만 동작시 키더라도 인가된 회전모멘트로 인하 선박의 회전이 항상 무게중심 축에 관하여 일어나기 때문이다. 선미의 Side thruster의 추력에 의해 선박의 이동과 회전 이 동시에 발생하는 선박의 선회운동을, 순수 이동운동이 먼저 일어나고 그 다 음 무게중심에 대한 순수 회전운동이 일어나는 순차적 운동으로 그림 3.10과 같이 분해할 수 있다[14~15].

결론적으로 선수 회전중심의 위치가 이동하는 속도를 선박의 순수 이동속도 와 순수 선회로 인한 속도의 합으로 구할 수 있고, 선수 회전중심 축의 위치가 선박 고정좌표계의  $x_by_b$ -평면상에서 이동되고 있음을 알 수 있다. 그러므로

$$V_b = V + V_r \tag{3.1}$$

로 표현되고, 여기서 V는 순수 이동속도(선박 상의 모든 점들은 동일한 속도 로 이동)로서 선수방향 속도성분 u와 횡방향 속도성분은 v를 가진다[16]. 또 한

$$V_r = r \times x_{br} \tag{3.2}$$

로서 무게중심 축 주위의 순수회전으로 인한 선수 회전중심의 이동속도로서 결 과는 횡방향 속도성분만을 가진다. 이 때 그림 3.9와 그림 3.10, 식 (3.1)과 (3.2)에 사용된 용어들을 설명하면 표 3.7과 같다.



그림 3.9 선박의 선수중심 축 회전에 대한 운동 분석

Fig. 3.9 A motion analysis for rotation about bow center axis



그림 3.10 선박의 선수중심 선회운동의 분해

Fig. 3.10 Motion decomposition of the rotation about bow center axis

## 표 3.7 모드7에서 사용된 용어들의 설명

용어	설 명	용어	설 명
$x_b$	선체고정좌표계의 $X$ 좌표(선수방향)	$V_b$	선수 회전중심의 이동속도
$y_b$	선체고정좌표계의 $Y$ 좌표(횡방향)	$u_b$	선수 회전중심 이동속도의 $X$ 성분
V	무게중심의 이동속도	$v_b$	선수 회전중심 이동속도의 $Y$ 성분
u	무게중심 이동속도의 $X$ 성분 (선박으로부터 측정)	$x_{br}$	무게중심에서 선수중심까지의 거리 (부호는 +임)
v	무게중심 이동속도의 Y 성분 (선박으로부터 측정)	$\Delta \psi$	선회로 인한 회두각의 증분
r	선박의 선회속도(회두각속도)	$T_{st}$	선미 Side thruster 추력

상기에서 설명된 내용을 바탕으로 선수모드 즉 선수를 중심으로 회전시키는 운 동명령인 모드7의 경우에 있어서 명령입력으로 설정되는 운동변수와 이들에 대 한 기준 값 계산식은 표 3.8과 같다.

ARIIM*E II* 

표 3.8 모드7의 명령입력 운동변수와 기준 값 계산식 Table 3.8 Input variables and computation equations for mode 7

명령입력 운동변수	운동변수 기준 값 계산식	실제 동작중인 선박 운동변수 $V_b$ 의 계산
$u_{ref}$	$u_{ref} = u_b = 0$	$u_b = u$
$v_{ref}$	$v_{ref} = v_b = 0$	$v_b = v + x_{br}  r$ (r의 +방향 : 시계방향)
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0+\psi_{JOG}$	$\psi_{ref}$ : 선회목표 기준 회두각 $\psi_0$ : 선박의 초기 회두각 $\psi_{JOG}$ : 조그 다이얼 선회명령 각

따라서 선수 회전중심의 위치를 이동시키지 않고 선수를 중심으로 선박을 회전 시키기 위해서는, 선수 회전중심의 선수방향 속도  $u_b = 0$ 가 되도록 후미 CPP의 추력을 발생시켜야 하고, 횡방향 속도  $v_b = 0$ 가 되도록 선수 Side thruster의 추력을 발생시켜 선수 회전중심의 위치를 동적으로 고정시켜야 한다.

#### 8) 모드 8에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

선회명령에 대한 중심모드인 모드8은, 선박의 무게중심 축에 관하여 선박이 회전만 하는 운동의 형태를 정의하는 것으로 회전중심이 되는 무게중심 위치는 이동하지 않아야 한다. 무게중심 축에 관하여 회전하기 위해서는, 선수 및 선 미 측에 부착된 Side thruster에 의해 추력모멘트를 무게중심을 기준으로 동일 하게 인가함으로써, 무게중심의 위치가 이동하지 않은 상태에서 순수한 회전만 발생시키도록 할 수 있다.

그림 3.11은 선수 및 선미에 부착된 Side thruster를 동시에 구동하여 선박 의 무게중심 위치를 변경시키지 않고 원하는 회두각 만큼 선회시키는 것을 나 타낸 것이다. 원리는 선미 Side thruster 구동으로 인한 무게중심의 이동속도  $V_{st}$ 와 크기는 같고 방향이 반대인  $V_{bo} = -V_{st}$ 를 선수 Side thruster를 구동하 여 발생시키는 것이다.



그림 3.11 선박의 무게중심 선회결과로 일어난 운동의 분해 Fig. 3.11 Motion decomposition of the rotation about gravity center axis

#### 표 3.9 모드8에서 사용된 용어들의 설명

용어	설 명		설 명
$T_{st}$	$T_{st}$ 선미 Side thruster 추력		선수 Side thruster 추력
V	선미 Side thruster 추력으로 인한	V.	선수 Side thruster 추력으로
v <sub>st</sub>	무게중심의 이동속도	v bo	인한 무게중심의 이동속도
m	선미 Side thruster 추력으로 인한	m	선수 Side thruster 추력으로
$T_{st}$	선박의 회두각속도	$T_{bo}$	인한 선박의 회두각속도
V	무게중심 이동속도, $ V =\sqrt{u^2+v^2}$	$\Delta \psi$	선회로 인한 회두각의 증분
	선박의 선회속도(회두각속도)		무게중심 이동속도의 $X$ 성분
r	$r = r_{st} + r_{bo}$	u	(선박으로부터 측정)
v	무게중심 이동속도의 $Y$ 성분		

표 3.9는 그림 3.11에서 사용된 용어들을 설명한 도표이다. 따라서 무게중심의 이동속도는 식 (3.3)과 같이 0 이 되어야 하고,

$$V = V_{st} + V_{bo} = 0 (3.3)$$

식 (3.3)을 만족시키도록 Side thruster의 추력을 할당함으로써 무게중심의 이 동 없이 선박의 회전을 달성할 수 있다.

EP EP

표 3.10 모드8에 대한 선박운동 변수 명령입력의 기준 값 계산식 Table 3.10 Input variables and computation equations for mode 8

명령입력 운동변수	운동변수 기준 값	설 명
$u_{ref}$	$u_{ref}=u=0$	무게중심 선수방향 기준속도
$v_{ref}$	$v_{ref} = v = 0$	무게중심 횡방향 기준속도
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0+\psi_{JOG}$	$\psi_{ref}$ : 선회해야 할 기준 회두각 $\psi_0$ : 선박의 초기 회두각 $\psi_{JOG}$ : Jog dial 선회명령 각

이상에서 설명한 내용을 종합하면 무게중심에 관하여 선박이 선회할 때 요구 되는 명령입력 변수와 이들에 대한 기준 값을 생성하기 위한 계산식은 표 3.10 과 같이 정리된다.

#### 9) 모드 9에 대한 선박운동 명령입력 기준 값 생성알고리즘

모드9는 선회명령에 대한 선미모드로서, 선미를 중심으로 선박이 회전만 하 는 운동의 형태를 정의하는 것으로 회전중심이 되는 선미의 위치는 이동하지 않아야 함을 전제로 한다. 선미를 중심으로 회전하기 위해서는 선수 측에 부착 된 Side thruster에 의해서만 추력모멘트를 발생시켜 선박을 회전시켜야 하는 데, 선박이 물 위에 떠 있어 회전축이 고정되어 있지 않기 때문에 선수 측에 부착된 Side thruster만을 동작시키더라도 선체 주변 유체의 운동으로 인해 선 미 회전중심의 위치가 선수방향 및 횡방향으로 약간씩 이동하게 된다.

그림 3.12는 선미중심에 대한 선박의 회전을 나타낸 것이고, 이 운동을 해석하 면 그림 3.13과 같이 무게중심에 대한 순수이동과 무게중심 축에 대한 순수회 전으로 분해할 수 있다[14~15].



그림 3.12 선박의 선미중심 축 회전에 대한 운동 분석 Fig. 3.12 A motion analysis for rotation about stern center axis



그림 3.13 선박의 선미중심 선회운동의 분해

Fig. 3.13 Motion decomposition of the rotation about stern center axis

이 때 그림 (3.12)와 그림 (3.13)에서 사용된 좌표축, 변수 및 상수 등 용어들 을 설명하면 표 3.11과 같다.

표 3.11 모드9에서 사용된 용어들의 설명 Table 3.11 Explanation of terminologies in mode 9

용어	설명 19	용어	설명
$x_b$	선박의 선수방향 좌표축	$V_s$	선미 회전중심의 이동속도
$y_b$	선박의 횡방향 좌표축	$u_s$	선미 회전중심 이동속도의 $X$ 성분
V	무게중심의 이동속도	$v_s$	선미 회전중심 이동속도의 $Y$ 성분
u	무게중심 이동속도의 X 성분 (선박으로부터 측정)	$x_s$	무게중심에서 선미중심까지의 거리 (부호는 -임)
v	무게중심 이동속도의 (선박으로부터 측정)	$\Delta \psi$	선회로 인한 회두각의 증분
r	선박의 선회속도(회두각속도)	$T_{bo}$	선수 Side thruster 추력

선미 회전중심 축을 중심으로 선박을 회전시키기 위하여, 선수 Side thruster 의 추력만으로 선회하는 선박의 운동을 그림으로 나타내면, 그림 3.13과 같이

선박의 무게중심의 이동운동과 무게중심 축에 대해 선회하는 회전운동이 동시 에 일어나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는, 선미를 중심으로 회전시키기 위하 여 선수 Side thruster만 동작시키더라도 인가된 회전모멘트로 인한 선박의 회 전은 항상 무게중심 축에 관하여 일어나기 때문이다.

결론적으로 선미 회전중심의 위치가 이동하는 속도를 선박의 순수 이동속도 와 순수 선회로 인한 속도의 합으로 구할 수 있고, 선미 회전중심 축의 위치가 선박에 고정된 이동좌표  $x_h y_b$ -평면상에서 이동되고 있음을 알 수 있다.

 $V_s = V + V_r \tag{3.4}$ 

여기서 V 는 무게중심의 순수 이동속도(선박 상의 모든 점들은 동일한 속도로 이동)로서 선수방향 속도성분은 u와 횡방향 속도성분은 v를 가진다[16].

A BUINE HAL

$$V_r = r \times x_s \tag{3.5}$$

여기서  $V_r$ 은 무게중심 축 주위의 순수회전으로 인한 선미 회전중심의 이동속 도로서 결과는 횡방향 속도성분만 가진다.따라서 선미 회전중심의 위치를 이동 시키지 않고 선미를 중심으로 선박을 회전시키기 위해서는, 선미 회전중심의 선

표 3.12 모드9에 대한 선박운동 변수 명령입력의 기준 값 계산식 Table 3.12 Input variables and computation equations for mode 9

명령입력 운동변수	운동변수 기준 값 계산식	실제 동작중인 선박 운동변수 $V_s$ 의 계산
$u_{ref}$	$u_{ref}{=}u_s{=}0$	$u_s = u$
$v_{ref}$	$v_{ref}{=}v_s{=}0$	$v_s = v + x_s  r$ (r의 +방향 : 시계방향)
$\psi_{ref}$	$\psi_{ref}=\psi_0+\psi_{JOG}$	$\psi_{ref}$ : 선회목표 기준 회두각 $\psi_0$ : 선박의 초기 회두각 $\psi_{JOG}$ : Jog dial 선회명령 각

수방향 속도  $u_s = 0$ 가 되도록 후미 CPP의 추력을 발생시켜야 하고, 횡방향 속도  $v_s = 0$ 가 되도록 선미 Side thruster의 추력을 발생시켜 선미 회전중심의 위치 를 동적으로 고정시켜야 한다.

위의 내용을 종합하면, 모드9 즉 선미모드 명령에 대해 생성되어야 할 운동변 수와 이들의 기준 값을 계산하기 위한 알고리즘을 정리하면 표 3.12와 같다.



## 제 4 장 요구추력과 요구추력모멘트의 계산

# 4.1 요구추력과 요구추력모멘트를 계산하기 위한 3자유도 비선형 선박운동방정식

현재 선박이 가져야 하는 운동을 발생시키기 위하여 선박의 운동축  $x_b, y_b$ 축 에 대한 추력장치가 발생시켜야 할 요구추력과  $z_b$ 축에 대한 요구추력모멘트를 계 산하기 위해서는, 선체가 가져야할 요구가속도에 의한 관성력과 요구 각가속도에 의한 관성모멘트는 물론 선체주위의 유체 운동으로 인한 부가질량의 관성력 및 관성모멘트, 유체 점성력 및 점성모멘트 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 한다. 이를 위해서 본 논문에서는 선박이 저속에서 조종운동을 하고 있다는 가정 하에 2장에서 유도된 3자유도 비선형 방정식을 요구추력과 요구추력모멘트를 계 산하기 위한 선박운동방정식을 기본 식으로 사용한다.

따라서 식 (2.50)~(2.52)를 다시 쓰면 식 (4.1)~(4.3)과 같다.

현재 샘플링시간  $nT_s$ 에서의 선박운동을 토대로 다음 단계  $(n+1)T_s$ 에서 발생 시켜야 할  $x_b$ 축 방향 요구추력  $X_C(n+1)$ 은

$$X_{C}(n+1) = (m - X_{\dot{u}})\dot{u}(n) - (m - Y_{\dot{v}})v(n)r(n)$$
(4.1)

이고, 
$$y_b$$
축 방향 요구추력  $Y_C(n+1)$ 은  
 $Y_C(n+1) = (m - Y_v)\dot{v}(n) - Y_v v(n) - (Y_r - mu(n))r(n) - Y_\delta\delta(n)$  (4.2)

이며, 
$$z_b$$
축 회전방향 요구추력모멘트  $N_C(n+1)$ 은  
 $N_C(n+1) = (I_z - N_r)\dot{r}(n) - N_v v(n) - N_r r(n) - N_\delta \delta(n)$  (4.3)

과 같다. 여기서 선박으로부터 측정되어야 하는 정보는 u(n), v(n), r(n)에 해

당하는 샘플링시간  $nT_s$ 에서의 선속도와 각속도이고, 샘플링시간  $nT_s$ 에서의 Rudder 구동각  $\delta(n)$ 이다.  $\dot{u}(n)$ ,  $\dot{v}(n)$ 은 샘플링시간  $nT_s$ 에서 선박운동을 토대 로 구해지는 각각  $x_b$ ,  $y_b$ 축에 대한 요구 선가속도이고  $\dot{r}(n)$ 은  $z_b$ 에 대한 요구 각가속도이며, 나머지 상수들은 유체력 미계수들로서 선체요목을 사용하여 관 련된 계산식에 의해 구할 수 있다.

그러므로 식 (4.1)~(4.3)으로부터 요구추력  $X_C(n+1)$ ,  $Y_C(n+1)$ , 요구추력 모멘트  $N_C(n+1)$ 을 구하기 위해서는 요구 선가속도  $\dot{u}(n)$ ,  $\dot{v}(n)$ 과 요구 각가 속도  $\dot{r}(n)$ 을 구하여야 한다. 요구추력 및 요구추력모멘트 계산알고리즘은 그 림 4.1과 같다.



그림 4.1 요구추력과 요구추력모멘트의 계산알고리즘 Fig. 4.1 An algorithm for computing required thrusts and a moment

## 4.2 요구 선가속도와 요구 각가속도의 계산

오퍼레이터 조작명령의 인식의 결과로부터 현재 활성화되어 있는 추력장치의 능 력을 감안하여 정의된 운동변수와 계산된 운동변수 명령입력 기준 값을 선박이 갖도록 하기 위해서는, 선박의 추력장치가 발생해야 할 추력을 계산해야 하는데, 이를 위해서는 전진방향과 횡방향의 요구 선가속도 u(n), v(n)와 선회방향의 요 구 각가속도 r(n)를 계산하여 이들을 선박의 운동방정식에 대입함으로써 선체운 동 시 발생하는 유체동역학적 특성을 감안한 요구추력을 계산할 수 있다. 요구 선가속도와 요구 각가속도는 계산된 운동명령 변수의 기준속도 값과 측정된 선박 의 현재속도를 이용하여 매 샘플링시간마다 계산하여야 한다. 이 때 가속도는 시 간에 따라 계속 변하지만 샘플링시간 동안은 일정하다는 가정 하에 샘플링 주기 동안의 평균가속도를 계산하여 사용하는 것이 타당하다.

# 4.2.1 샘플링 주기마다 선가속도 $\dot{u}(n), \dot{v}(n)$ 의 계산

현재 시간  $nT_s$ 에서  $x_b$ 축 방향 기준속도가  $u_{ref}$ , 선박의  $x_b$ 축 방향 현재속도가 u(n)일 경우  $x_b$ 축 방향 평균 가속도  $\dot{u}(n)$ 은 식 (4.4)로 구할 수 있다.

$$\dot{u}(n) = \frac{u_{ref} - u(n)}{T_s} \tag{4.4}$$

현재 시간  $nT_s$ 에서  $y_b$ 축 방향 기준속도가  $v_{ref}$ , 선박의  $y_b$ 축 방향 현재속도가  $\dot{v}(n)$ 일 경우  $y_b$ 축 방향 평균 가속도  $\dot{v}(n)$ 은 식 (4.5)로 구할 수 있다.

$$\dot{v}(n) = \frac{v_{ref} - v(n)}{T_s} \tag{4.5}$$

여기서, T<sub>s</sub>는 샘플링 시간이다.

#### 4.2.2 샘플링 주기마다 각속도와 각가속도의 계산

현재 시간  $nT_s$ 에서  $z_b$ 축에 관한 회전방향의 기준 회두각이  $\psi_{ref}$ , 현재 회두각 이  $\psi(n)$ 일 경우  $z_b$ 축에 관한 회전방향 기준 각속도  $r_{ref}(n)$ 는 식 (4.6)으로 계산된다.

$$r_{ref}(n) = \frac{\psi_{ref} - \psi(n)}{T_s} \tag{4.6}$$

이 때  $z_n$ 축 방향 평균 각가속도  $\dot{r}(n)$ 은 식 (4.7)로부터 계산된다.

$$\dot{r}(n) = \frac{r_{ref}(n) - r_{ref}(n-1)}{T_s}$$
(4.7)

한편, 현재 샘플링시간  $nT_s$ 에서 선박의 회두각  $\psi(n)$ 이 선박의 기준 회두각  $\psi_{ref}$ 와 같지 않을 경우에는 회두각가속도를 식 (4.7)과 같이 평균 각가속도로 설 정하고, 같을 경우에는 현재 샘플링시간  $nT_s$ 에서 선박의 회두각속도가 0 이냐에 따라 식 (4.8)과 (4.9)로부터  $\dot{r}(n)$ 을 계산한다.

$$r(n) = 0 일 경우 : \dot{r}(n) = 0$$
 (4.8)

$$r(n) \neq 0 일 경우 : \dot{r}(n) = \frac{0 - r(n)}{T_s}$$
(4.9)

그림 4.2는 오퍼레이터에 의해 내려지는 운동명령 모드별 명령입력 변수의 기준 값과 현재의 선박운동으로부터 측정한 운동변수 값을 이용하여  $x_b$ ,  $y_b$ 축 에 대한 평균 선가속도와  $z_b$ 축에 대한 평균 각가속도를 구하는 알고리즘을 도 시한 것이다.



그림 4.2 명령입력 기준 값 추종을 위한 선가속도 및 각가속도 계산알고리즘 Fig. 4.2 An algorithm for computing linear accelerations and an angular acceleration for asymptotically following reference inputs of command variables

# 제 5 장 요구추력과 추력모멘트의 추력장치 할당알고리즘

그림 5.1와 같이 대상선박은 선미에 가변피치 프로펠러 CPP를 2개 장착하고 있 고, 선수와 선미측에 각각 2개의 Side thruster를 장착하고 있다고 가정한다. 조 종운동에 있어서 Rudder에 의한 타력저항 자체는 그다지 크지 않고, 선박운동방정식 에서  $y_b$ 축 및  $z_b$ 축 회전 방정식에 나타낸 Rudder에 대한 표현은 선박의 전진방향의 속도가  $u \approx V$ 로서 선속과 거의 같을 때 타각에 의한 영향이  $y_b$ 축 횡방향 이동과  $z_b$ 축에 대한 회전에 미치는 것을 나타내는 것임으로, 속도가 낮은 이동과 회전에 대한 조종운동의 할당알고리즘에서는 취급할 필요가 없으므로 언급하지 않는다.

현재의 샘플링시간  $nT_s$ 에서의 선박운동 정보를 바탕으로 다음 샘플링시간  $(n+1)T_s$  있어서 추력장치에 의해 발생되어야  $x_b, y_b$ 축의 요구추력과  $z_b$ 축 회전



그림 5.1 고려대상 선박의 추력장치와 설치위치

Fig. 5.1 Ship actuators and attached positions under consideration

에 대한 요구추력모멘트는  $X_C(n+1)$ ,  $Y_C(n+1)$ ,  $N_C(n+1)$ 으로 계산되어 있 고, 조이스틱의 조작에 의해 360° 방향으로 선박을 조종하는 선박 통합제어시스 템에서는  $x_b$ 축의 요구추력은 선미의 CPP에 의해서만 발생되고,  $y_b$ 축의 요구추력 은 선수 및 선미측의 Side thruster에 의해서만 발생되며,  $z_b$ 축 회전에 대한 요 구추력모멘트는 선수 및 선미측의 Side thruster에 의해서 발생된다고 가정한다.

그림 5.1에 있어 무게중심 CG를 기준으로 추력장치의 설치위치를 나타내는 설 명은 표 5.1과 같다.

표 5.1 추력장치의 설치위치의 정의

Table 5.1 Definition of attached positions of actuators

위치	설 명	위치	설 명		
$y_{p1}$	<i>CG</i> 를 통과하는 선수방향		CG를 통과하는 횡방향 중심선에서		
	중심선에서 CPP1까지의 거리	$x_{bo2}$	선수 Side thruster2까지의 거리		
$y_{p2}$	<i>CG</i> 를 통과하는 선수방향	r	<i>CG</i> 를 통과하는 횡방향 중심선에서		
	중심선에서 CPP2까지의 거리	$x_{st}$	선미 Side thruster까지의 평균거리		
$x_{bo}$	<i>CG</i> 를 통과하는 횡방향 중심선에서	r	CG를 통과하는 횡방향 중심선에서		
	선수 Side thruster까지의 평균거리	$x_{st1}$	선미 Side thruster1까지의 거리		
$x_{bo1}$	CG를 통과하는 횡방향 중심선에서	m	CG를 통과하는 횡방향 중심선에서		
	선수 Side thruster1까지의 거리	$x_{st2}$	선미 Side thruster2까지의 거리		
	े में दे		ii -		

### 5.1 이동명령 모드 1~모드6에 대한 추력 할당알고리즘

이동명령모드인 모드1에서부터 모드6에 대응하는 요구추력과 요구추력모멘트 를 할당하기 위하여 대상선박에서 고려하여야 하는 전제조건과 선박제원에 대 한 가정은 다음과 같다.

- (1) 선박에 장착된 모든 추력장치는 현재 활성화되어 있다고 가정한다.
- (2) x<sub>b</sub>축의 요구추력 X<sub>C</sub>는 CPP 2개에 의해서 발생되고 동일한 크기로 발생 된다고 가정한다.

- (3) CPP의 설치위치는 좌우대칭이라고 가정한다. 즉 y<sub>p1</sub> = y<sub>p2</sub>이다. 따라서 2 개의 CPP 추력에 의해서 발생되는 z<sub>b</sub>축 회전에 대한 모멘트는 발생되지 않는다고 가정한다.
- (4)  $y_b$ 축의 요구추력  $Y_C$ 는 선수 Side thruster 2개, 선미 Side thruster 2 개에 의해서만 발생된다고 가정한다.
- (5) 선수측 Side thruster에 의해 발생이 요구되는 z<sub>b</sub>축 회전에 대한 추력모 멘트는 선수측 Side thruster1과 Side thruster2에 동일하게 배분된다고 가정한다.
- (6) 선미측 Side thruster에 의해 발생이 요구되는 z<sub>b</sub>축 회전에 대한 추력모 멘트는 선미측 Side thruster1과 Side thruster2에 동일하게 배분된다고 가정한다.

위와 같은 가정 하에 추력을 할당하기 위한 방정식은 다음 식 (5.1)과 같다.

 $T_{cpp1} = T_{cpp2}$   $T_{cpp1} + T_{cpp2} = X_{c}$   $T_{st} + T_{bo} = Y_{c}$   $T_{st} x_{st} + T_{bo} x_{bo} = N_{c}$   $T_{st} x_{st} + T_{st2}$   $T_{st} x_{st} = T_{st1} + T_{st2}$   $T_{st} x_{st} = T_{st1} x_{st1} + T_{st2} x_{st2}$   $T_{bo} = T_{bo1} + T_{bo2}$   $T_{bo} x_{bo} = T_{bo1} x_{bo1} + T_{bo2} x_{bo2}$ (5.1)

여기서  $x_{st}, x_{st1}, x_{st2}$ 는 (-)값이고  $x_{bo}, x_{bo1}, x_{bo2}$ 는 (+)값이다. 주어진 방정식을 연립하여 유도된 추력할당 알고리즘은 식 (5.2)와 같다.  $T_{qpp1} = \frac{1}{2}X_c$  (5.2)

$$\begin{split} T_{cpp2} &= \frac{1}{2} X_c \\ T_{st1} &= \frac{x_{bo}(-x_{st2} + x_{st})}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} Y_c + \frac{x_{st2} - x_{st}}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} N_c \\ T_{st2} &= -\frac{x_{bo}(-x_{st1} + x_{st})}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} Y_c + \frac{-x_{st1} + x_{st}}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} N_c \\ T_{bo1} &= \frac{(-x_{bo} + x_{bo2}) x_{st}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} Y_c \\ &- \frac{-x_{bo} + x_{bo2}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} N_c \\ T_{bo2} &= -\frac{(x_{b01} - x_{bo}) x_{st}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} Y_c \\ &+ \frac{x_{bo1} - x_{bo}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} N_c \end{split}$$

## 5.2 선수중심 선회명령 모드 7에 대한 추력 할당알고리즘

1945

선수를 중심으로 선회하는 명령인 모드7에 대응하는 요구추력과 요구추력모 멘트를 할당하기 위하여 대상선박에서 고려하여야 하는 전제조건과 선박제원에 대한 가정은 다음과 같다.

- (1) 선박에 장착된 모든 추력장치는 현재 활성화되어 있다고 가정한다.
- (2) 선수중심  $x_{br}$ 의  $y_b$ 축 방향 이동속도  $v_b$ 를 0으로 만들기 위하여 계산된 요 구추력  $Y_C$ 는 선수 Side thruster에만 할당된다고 가정한다.
- (3) 선수중심  $x_{br}$ 의  $x_b$ 축 방향 이동속도  $u_b$ 를 0으로 만들기 위하여 계산된 요 구추력  $X_C$ 는 CPP에만 할당된다고 가정한다.
- (4) 선수중심의 회전을 위해 계산된  $z_b$ 축에 관한 추력모멘트  $N_C$ 는 선미 Side thruster에 할당되지만, 선수중심  $x_{br}$ 의  $y_b$ 축 방향 이동속도  $v_b$ 를

없애기 위한 선수 Side thruster에 의한 추력과  $x_b$ 축 방향 이동속도  $u_b$ 를 없애기 위한 CPP 추력이 모멘트에 미치는 영향을 반영하여 할당된다고 가 정한다.

위와 같은 가정 하에서 활성화된 추력장치의 상태를 고려하여 추력을 할당하 기 위한 방정식은 다음 식 (5.3)과 같다.

$$T_{qp1} = T_{qp2}$$

$$T_{qp1} + T_{cpp2} = X_{c}$$

$$T_{bo1} + T_{bo2} = Y_{c}$$

$$T_{st} x_{st} + T_{bo} x_{bo} = N_{c}$$

$$T_{bo} = T_{bo1} + T_{bo2}$$

$$T_{st} = T_{st1} + T_{st2}$$

$$T_{bo} x_{bo} = T_{bo1} x_{bo1} + T_{bo2} x_{bo2}$$

$$T_{st} x_{st} = T_{st1} x_{st1} + T_{st2} x_{st2}$$
(5.3)

여기서  $x_{st}, x_{st1}, x_{st2}$ 는 (-)값이고  $x_{bo}, x_{bo1}, x_{bo2}$ 는 (+)값이다. 위 방정식을 연립하여 풀어 유도된 추력할당 알고리즘은 식 (5.4)와 같다.

$$T_{cpp1} = \frac{1}{2} X_c$$

$$T_{cpp2} = \frac{1}{2} X_c$$

$$T_{b01} = \frac{(x_{b0} - x_{b02})}{(x_{b01} - x_{b02})} Y_c$$

$$T_{b02} = -\frac{(x_{b0} - x_{b01})}{(x_{b01} - x_{b02})} Y_c$$
(5.4)

$$\begin{split} T_{st1} &= \frac{x_{bo}(x_{st2} - x_{st})}{x_{st}(x_{st1} - x_{st2})} Y_c - \frac{(x_{st2} - x_{st})}{x_{st}(x_{st1} - x_{st2})} N_c \\ T_{st2} &= -\frac{x_{bo}(x_{st1} - x_{st})}{x_{st}(x_{st1} - x_{st2})} Y_c + \frac{(x_{st1} - x_{st2})}{x_{st}(x_{st1} - x_{st2})} N_c \end{split}$$

## 5.3 무게중심 선회명령 모드 8에 대한 추력 할당알고리즘

무게중심에 대하여 선회하는 명령인 모드8에 대응하는 요구추력과 요구추력 모멘트를 할당하기 위하여 대상선박에서 고려하여야 하는 전제조건과 선박제원 에 대한 가정은 다음과 같다.

- (1) 선박에 장착된 모든 추력장치는 현재 활성화되어 있다고 가정한다.
- (2) 무게중심의 회전을 위해 계산된  $z_b$ 축에 관한 추력모멘트  $N_C$ 는 선미 Side thruster와 선수 Side thruster에만 할당된다고 가정한다.
- (3) 선수 및 선미 측에 부착된 Side thruster에 의한 추력모멘트는 무게중심
   을 기준으로 동일하게 작용되어야 하기 때문에, 선수 Side thruster의 추
   력과 선미 Side thruster의 추력은 반대방향으로 작용된다고 가정한다.
- (4) 현재 선박의 무게중심 이동속도 성분 u와 v를 측정하여 이들이 발생할 경우에는 0이 되도록 Side thruster와 CPP의 추력을 발생시켜야 한다. 이 때 무게중심의 yb<sup>\*</sup> 방향 이동속도 v를 없애기 위하여 계산된 요구추력 Y<sub>C</sub>은 활성화된 Side thruster에만 할당된다고 가정하고, 무게중심의 x<sub>b</sub> 축 방향 이동속도 u를 없애기 위하여 계산된 요구추력 X<sub>C</sub>은 CPP에만 할 당된다고 가정한다.

위와 같은 가정 하에서 추력을 할당하기 위한 방정식은 식 (5.5)와 같다.

$$T_{cpp1} = T_{cpp2}$$

$$T_{cpp1} + T_{cpp2} = X_c$$

$$T_{bo} + T_{st} = Y_c$$
(5.5)

$$\begin{split} T_{bo} x_{bo} + T_{st} x_{st} &= N_c \\ T_{bo} &= T_{bo1} + T_{bo2} \\ T_{bo} x_{bo} &= T_{bo1} x_{bo1} + T_{bo2} x_{bo2} \\ T_{st} &= T_{st1} + T_{st2} \\ T_{st} x_{st} &= T_{st1} x_{st1} + T_{st2} x_{st2} \end{split}$$

여기서  $x_{st}, x_{st1}, x_{st2}$ 는 (-)값이고  $x_{bo}, x_{bo1}, x_{bo2}$ 는 (+)값이다. 위 방정식을 연립하여 풀어 유도된 추력할당 알고리즘은 식 (5.6)과 같다.

$$\begin{split} T_{cpp1} &= \frac{1}{2} X_c \end{split} \tag{5.6} \\ T_{cpp2} &= \frac{1}{2} X_c \end{aligned} \tag{5.6} \\ T_{bo1} &= \frac{(-x_{bo} + x_{bo2}) x_{st}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} Y_c \\ &- \frac{-x_{bo} + x_{bo2}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} N_c \\ T_{bo2} &= -\frac{(x_{bo1} - x_{bo}) x_{st}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} N_c \\ &+ \frac{x_{bo1} - x_{bo}}{(-x_{bo} x_{bo2} + x_{st} x_{bo2} + x_{bo1} x_{bo} - x_{bo1} x_{st})} N_c \\ T_{st1} &= \frac{x_{bo}(-x_{st2} + x_{st})}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} Y_c + \frac{x_{st2} - x_{st}}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} N_c \\ T_{st2} &= -\frac{x_{bo}(-x_{st1} + x_{st})}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} Y_c + \frac{-x_{st1} + x_{st}}{x_{st1} x_{bo} - x_{st1} x_{st} - x_{st2} x_{bo} + x_{st2} x_{st}} N_c \end{split}$$

## 5.4 선미중심 선회명령 모드 9에 대한 추력 할당알고리즘

선미를 중심으로 선회하는 명령인 모드9에 대응하는 요구추력과 요구추력모 멘트를 할당하기 위하여 대상선박에서 고려하여야 하는 전제조건과 선박제원에 대한 가정은 다음과 같다.

- (1) 선박에 장착된 모든 추력장치는 현재 활성화되어 있다고 가정한다.
- (2) 선미중심  $x_s$ 의  $y_b$ 축 방향 이동속도  $v_s$ 를 없애기 위하여 계산된 요구추력  $Y_C$ 는 선미 Side thruster에만 할당된다고 가정한다.
- (3) 선미중심 x<sub>s</sub>의 x<sub>b</sub>축 방향 이동속도 u<sub>s</sub>를 없애기 위하여 계산된 요구추력
   X<sub>C</sub>는 CPP에만 할당된다고 가정한다.
- (4) 선미중심의 회전을 위해 계산된 z<sub>b</sub>축에 관한 추력모멘트 N<sub>C</sub>는 선수 Side thruster에만 할당되지만, 선미중심 x<sub>s</sub>의 y<sub>b</sub>축 방향 이동속도 v<sub>s</sub>를 없애기 위한 선미 Side thruster에 의한 추력과 x<sub>b</sub>축 방향 이동속도 u<sub>s</sub> 를 없애기 위한 CPP 추력이 모멘트에 미치는 영향을 반영하여 선수 Side thruster에 할당된다고 가정한다.

위와 같은 가정 하에서 추력을 할당하기 위한 방정식은 식 (5.7)과 같다.

$$T_{qp1} = T_{qp2}$$

$$T_{qp1} + T_{qp2} = X_c$$

$$T_{st1} + T_{st2} = Y_c$$

$$T_{st} x_{st} + T_{bo} x_{bo} = N_c$$

$$T_{bo} = T_{bo1} + T_{bo2}$$

$$T_{bo} x_{bo} = T_{bo1} x_{bo1} + T_{bo2} x_{bo2}$$

$$T_{st} = T_{st1} + T_{st2}$$

$$T_{st} x_{st} = T_{st1} x_{st1} + T_{st2} x_{st2}$$
(5.7)

여기서  $x_{st}, x_{st1}, x_{st2}$ 는 (-)값이고  $x_{bo}, x_{bo1}, x_{bo2}$ 는 (+)값이다. 위 방정식을 연립하여 풀어 유도된 추력할당 알고리즘은 식 (5.8)과 같다.

$$T_{cpp1} = \frac{1}{2} X_{c}$$

$$T_{cpp2} = \frac{1}{2} X_{c}$$

$$T_{bo1} = \frac{x_{st}(x_{bo2} - x_{bo})}{x_{bo}(x_{bo1} - x_{bo2})} Y_{c} - \frac{(x_{bo2} - x_{bo})}{x_{bo}(x_{bo1} - x_{bo2})} N_{c}$$

$$T_{bo2} = -\frac{x_{st}(x_{bo1} - x_{bo})}{x_{bo}(x_{bo1} - x_{bo2})} Y_{c} + \frac{(x_{bo1} - x_{bo})}{x_{bo}(x_{bo1} - x_{bo2})} N_{c}$$

$$T_{st1} = -\frac{x_{st2} - x_{st}}{x_{st1} - x_{st2}} Y_{c}$$

$$T_{st2} = \frac{x_{st1} - x_{st2}}{x_{st1} - x_{st2}} Y_{c}$$
(5.8)

5.5 명령모드에 따른 Rudder의 타각명령 생성 알고리즘

5.5.1 조이스틱 이동명령 모드에 대한 타각명령 생성 알고리즘 조이스틱 이동명령에 의해 선박이 이동해야 할 방향을 지시하는 조이스틱의 경사각 θ가 결정되면 현재 활성화된 추력장치에 의해 선박은 가속되면서 이동 하게 된다. 이 때 조종운동 하에서의 선박의 이동속도는 크지 않으므로 Rudder 에 의한 타력은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 Rudder는 선미에 부착 된 부가물로 간주될 수 있고 Rudder에 의한 유체저항은 선박이동의 조종운동에 큰 영향을 미치지 않게 된다. 그러나 선박의 이동방향을 고려하여 Rudder의 타 각을 조정하여 유체저항을 줄일 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 Rudder의 최대타각 범위 내에서 타각을 생성하는 알고리즘을 설명하면 다음과 같이 4가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. (1) 조이스틱 경사각  $0^{\circ} \le \theta \le 90^{\circ}$  일 때  $\alpha = 90^{\circ} - \theta$ ①  $\alpha \le \delta_{\max}$ 일 때  $\delta = -\alpha$  (5.9) ②  $\alpha > \delta_{\max}$ 일 때  $\delta = -\delta_{\max}$ 

조이스틱의 경사각 θ에 따른 타각명령에 대한 위의 4가지 경우를 흐름도로 나타내면 그림 5.2와 같다.



그림 5.2 타각명령 생성알고리즘의 흐름도

Fig. 5.2 A flowchart of rudder angle command generation algorithm

5.5.2 조그 다이얼 선회명령 모드에 대한 타각명령 생성 알고리즘 조그 다이얼 선회명령 하에서는 선박의 이동속도가 없기 때문에 Rudder는 선

미에 부착된 부가물에 불과하고 Rudder에 의한 유체저항은 선박의 선회에 다소 영향을 미치게 된다. 따라서 선박의 선회방향을 고려하여 Rudder의 타각을 조 정함으로써 유체저항을 줄일 수 있도록 하는 것이 바람직하고, 선회명령에 대 한 타각생성은 선회명령의 종류 즉 선수중심 선회, 무게중심 선회, 선미중심 선회에 상관없이 선회방향에 의해서만 좌우된다. 이를 위한 Rudder의 타각을 생성하는 알고리즘은 다음과 같다.

(2) 조그 다이얼 명령각 
$$\psi_{ref} - \psi_0 = \psi_{JOG} < 0$$
일 때  
 $\delta = -\delta_{max}$  (5.14)



# 제 6 장 시뮬레이션 및 고찰

# 6.1 시뮬레이션용 선박제원 및 유체력 미계수

본 논문에서 제안한 조이스틱 컨트롤기반 선박 통합제어시스템의 타당성을 검증 하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다.

표 6.1 선박 제원

Table 6.1 Principal dimensions of ship

Hull						
Length over all $L_{OA}$ $(m)$	188.0					
Length between perpendiculars $L_{PP}$ $(m)$	175.0					
Breadth B (m)	25.4					
Depth D (m)	15.4					
Draft d (m)	8.5					
Trim $ au$ $(m)$	1.0					
Block coefficient $C_B$	0.559					
Prismatic coefficient $C_p$	0.58					
Distance between 2 propellers	0.3B					
Angle of bossing to horizontal of or c	90					
Radius of gyration about z-axis	0.24					
Longitudinal center of gravity from midship	-0.018					
Rudder						
Area $A_R$ $(m^2)$	13.345					
Height H (m)	5.44					
Aspect ratio $\lambda$	1.833					
Area ratio $A_R/Ld$	1/55.73					
Propeller						
Diameter D (m)	4.6					
Pitch Ratio P/D	1.055					
Expanded area ratio	0.73					
Number of Blades	5					
Tuning direction(looking from stern)	outboard					

본 논문에서 제안한 조이스틱 컨트롤기반 선박 통합제어시스템의 타당성을 검증 하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 선박은 기존의 SR-108 컨테이너운반 선을 기본으로 선미, 선수 측에 각각 Side thruster 2개 2조, CPP 2개, 1개의 Rudder를 가진 것으로 가정한 선박으로서 선박제원은 표 6.1과 같다[6].

다음은 본 논문에서 제안한 선박운동 모델에 필요한 유체력 미계수들이고 선 체요목으로부터의 다음의 계산식에 의해 구해진다. 표 6.2는 선체요목으로부터 구한 유체력 미계수이다.

$$\begin{split} m &= \frac{1}{2} \rho L^2 d \left[ 2C_B / \left(\frac{L}{B}\right) \right] \\ I_z &\approx (0.25L)^2 m \\ &- X_v \approx (0.05 \sim 0.1) m \\ &- Y_v \approx (0.7 \sim 1.0) m \\ &- N_r \approx (0.8 \sim 1.0) I_z \\ &- X_u' &= (0.03 \sim 0.05) m' \\ &- Y_v' &= \pi \left(\frac{d}{L}\right) \left\{ 1.0 + 0.16 C_B \left(\frac{B}{d}\right) - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \right\} \\ &- N_r' &= \pi \left(\frac{d}{L}\right) \left\{ \frac{1}{12} + 0.017 C_B \left(\frac{B}{d}\right) - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right) \right\} \\ Y_v' &= - \left(\frac{1}{2} \pi \Lambda + 1.4 C_B \frac{B}{L}\right) \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\tau}{d}\right) \\ Y_r' &= \frac{1}{4} \pi \Lambda \left(1 + 0.8 \frac{\tau}{d}\right) + X_u' \\ N_v' &= - \Lambda \left(1 - \frac{0.27}{l_v'} \frac{\tau}{d}\right) \\ N_r' &= - \left(0.54\Lambda - \Lambda^2\right) \left(1 + 0.3 \frac{\tau}{d}\right) \\ Y_{\delta}' &= - \left(\frac{A_R}{Ld}\right) \left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a(\lambda) \left(1 + a_H\right) \end{split}$$

$$\begin{split} N_{\delta}' &= -\left(\frac{A_{R}}{Ld}\right)\left(\frac{V_{R}}{V}\right)^{2} f_{a}(\lambda)\left(x_{R}' + a_{H}x_{H}'\right) \\ m' , X_{u}' , X_{v}' , Y_{v}' &= m , X_{u} , X_{v} , Y_{v} / \left(\frac{1}{2}\rho L^{2}d\right), \\ N_{r}' &= N_{r} / \left(\frac{1}{2}\rho L^{4}d\right) \\ Y_{v}' , Y_{\delta}' &= Y_{v}, Y_{\delta} / \frac{1}{2}\rho L^{2}dV^{2} \\ N_{v}' , N_{\delta}' &= N_{v}, N_{\delta} / \frac{1}{2}\rho L^{2}dV^{2} \\ Y_{r}' &= Y_{r} / \frac{1}{2}\rho L^{2}dV \\ N_{r}' &= N_{r} / \frac{1}{2}\rho L^{3}dV \\ \text{ql} H & L : \text{dM} 2\text{ql}, \\ \rho : \text{fMMP} &= \text{Edd}(\text{sd} + \text{gd} + 104.6 \text{ kgf:sec}^{2}\text{m}^{-4}), B : \text{dF} \\ d : &= \text{d} = \frac{2d}{L} \\ l_{v}' &= \Lambda / \left(\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4C_{B}\frac{B}{L}\right) \\ A_{R} : &= \text{FP} &= \text{Hed}(\text{projected area}) \\ f_{\alpha}(\lambda) &= \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} & \text{Hed}, 1.0 \leq \lambda \leq 2.5 \\ \lambda &= \frac{H}{C} : &= \text{FP} &= \text{Hed}(\text{Aspect ratio}) \\ (\text{H} : &= \text{Hed} &= \text{R}/L : \text{d} = \text{Hed}(\text{R}) \\ x_{R}' &= x_{R}/L : \text{d} = \text{Hed}(\text{R}) \\ x_{R}' &= x_{R}/L : \text{d} = \text{Hed}(\text{R}) \\ a_{H}, x_{H} : \text{d} = \text{d} = \text{Ord}, \\ \end{array}$$

# 표 6.2 선체요목으로부터 구한 유체력 미계수

요구 계수	:	계산식 및 필요 계수	
및 유체력	미계수	1 T	
m	(kg)	$m = \frac{1}{2}\rho L^2 d \left[ 2C_B / \left(\frac{L}{B}\right) \right]$	220940
$I_z$ (kg	$g \bullet m^2)$	$I_z  pprox  (0.25L)^2 \; m$	422892968
$X_{\dot{v}}$	(kg)	$-X_{\dot{v}} \approx (0.05 \sim 0.1) m$	11047
$Y_{\dot{v}}$	(kg)	$-Y_{\dot{v}} \approx (0.7 \sim 1.0) m$	1767356
$N_r^{\cdot}$ (k	$g \bullet m^{2)}$	$-N_{ec{r}} pprox \left(0.8 \sim 1.0 ight) I_z$	39482.1
$Y_v$ '		$Y_{v}{}' = -(\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4C_{B}\frac{B}{L})(1 + \frac{2}{3}\frac{\tau}{d})$	-0.286973
$Y_v$		$Y_v' = Y_v / \frac{1}{2} \rho L dV^2$	$-22332  imes V^2$
$Y_r$		$Y_r' = Y_r / \frac{1}{2} \rho L^2 dV$	1202800  imes V
$Y_{\delta}$		$Y_{\delta}^{\prime}=~Y_{\delta}/rac{1}{2} ho LdV^{2}$	$-5882 \times V^2$
$N_v$		$N_v' = N_v \ / \frac{1}{2} \rho L^2 dV^2$	$-1207400 \times V^2$
$N_r$		$N_r' = N_r  / \frac{1}{2} \rho L^3 dV$	$-106110000 \times V$
$N_{\delta}$		$N_{\delta}^{\prime}=N_{\delta}/rac{1}{2} ho L^2 dV^2$	$510730  imes V^2$
$Y_r$ '		$Y_{r}' = \frac{1}{4}\pi\Lambda(1+0.8\frac{\tau}{d}) + X_{u}'$	0.0840833
$N_v$ ʻ		$N_{v}{}'=-\Lambda(1-\frac{0.27}{l_{v}{}'}\frac{\tau}{d})$	-0.886901
$N_r$ ' (kg	$g \bullet m^2)$	$N_{r}{}' = -(0.54\Lambda - \Lambda^{2})(1 + 0.3\frac{\tau}{d})$	-0.0445387

Table 6.2 Hydrodynamic derivatives and constants from ship dimension

## 6.2 선박 통합제어시스템의 시뮬레이터 구성

그림 6.1은 본 논문에서 제안한 선박 통합제어 시스템 전체 구성도이다.



그림 6.1 선박 통합제어시스템 전체 구성도

Fig. 6.1 A configuration of the integrated control system of the ship



그림 6.2 구축된 선박 통합제어시스템 시뮬레이터 Fig. 6.2 An implemented simulator of the integrated control system


그림 6.3 MATLAB SIMULINK를 이용한 전체 시뮬레이터 구성 Fig. 6.3 Simulator configuration using MATLAB SIMULINK

그림 6.2는 시뮬레이션을 수행하기 위하여 구축한 시뮬레이터 구축환경 사진으 로서 오퍼레이터의 조작명령을 내리는 조이스틱과 조그 다이얼은 실물인 Logitech ATK3를 사용하였으며 대상선박은 수학모델을 토대로 MATLAB SIMULINK 프로그램을 사용하여 구성하였으며 그 외의 선박통합제어시스템 구성에 필요한 알고리즘들은 MATLAB 소프트웨어를 사용하여 구성하였다.

그림 6.3은 MATLAB SIMULINK 프로그램을 사용하여 구성한 선박 통합제어시스템 전체 소프트웨어를 나타낸 그림이다.

#### 6.2.1 조이스틱 명령입력 모듈 구성

그림 6.4는 전체 시뮬레이터 구성 중 조이스틱 명령입력 모듈의 구성이다. Pilot joystick All 블럭을 이용해서 오퍼레이터 조작명령의 입력장치인 조이스 틱과 조그 다이얼의 입력을 받는다.  $x_b$ 와  $y_b$ 로 구분하고 이를 angle\_fun.m파일이 들어있는 MATLAB Function 블록을 이용해 조이스틱 경사각  $\theta$ 를 구한다. 조이스틱 의 미세한 움직임에 대응하지 않기 위해 Dead zone을 설정하는 zerocondition.m 을 설정한다. 이에 출력은  $x_b$ 와  $y_b$ 축 조이스틱과 조그 다이얼, zero condition 설정 값과 조이스틱 경사각  $\theta$ 이다.



그림 6.4 조이스틱 명령입력 모듈 Fig. 6.4 A joystick command input module

## 6.2.2 선박 운동변수 기준입력 생성모듈 구성

그림 6.5는 전체 시뮬레이터 구성 중 선박 운동변수 기준입력 생성모듈의 구성 이다. 조이스틱 명령입력 모듈에서 출력된  $x_b$ 와  $y_b$ 축 조이스틱과 조그 다이얼, zero condition 설정 값과 조이스틱 경사각 θ을 입력으로 받아 조이스틱 이동모 드에 대해서는 설정속도, 가변속도모드에 따라 모드1~6을 정하고 조그 다이얼 선 회모드에 대히서는 선수모드인 모드7, 중심모드인 모드8, 선미모드인 모드9에 따 라 기준입력  $u_{ref}$ ,  $v_{ref}$ ,  $\psi_{ref}$ 를 출력한다.



그림 6.5 선박운동변수 기준입력 생성모듈

Fig. 6.5 A reference input generation module for motion variables

### 6.2.3 선가속도 및 각가속도 계산 모듈 구성

그림 6.6은 전체 시뮬레이터 구성 중 선가속도 및 각가속도 계산 모듈의 구성을 보여 주는 것이다. 선박운동 변수 기준입력 생성모듈에서 출력한 기준입력  $u_{ref}$ ,  $v_{ref}$  와 현재의 선박속도 u(n), v(n)을 비교하여  $x_b$ ,  $y_b$ 축 방향에 대한 선가속도  $\dot{u}(n)$ ,  $\dot{v}(n)$ 을  $uv_{fun.m}$ 파일이 들어있는 MATLAB Function 블록으로 계산하고, 선박 의 초기회두각  $\psi_{ref}$ 과 선박의 회두각  $\psi(n)$ 을 비교하여 기준 회두각  $\psi_{ref}$ 와 같지 않 을 경우 평균 각가속도  $\dot{r}(n)$ 를 설정하고 현재 선박의 회두각속도 r(n)이 0이냐에 따라 각가속도를  $z_{fun.m}$  파일이 들어있는 MATLAB Function 블록으로 계산한다.



그림 6.6 선가속도 및 각가속도 계산모듈 Fig. 6.6 A computation module for accelerations

## 6.2.4 요구추력 생성 모듈 구성

그림 6.7은 전체 시뮬레이터 구성 중 요구추력 생성 모듈을 MATLAB으로 구성한 것을 보여주는 그림이다.



그림 6.7 요구추력 생성모듈 Fig. 6.7 A generation module of required thrusts

thrust.m 파일이 들어있는 MATLAB Function 블록에는 선박의 3자유도 비선형 선

박운동방정식이 모델링되어 있으며, 이에 요구되는 선박의 운동축  $x_b$ ,  $y_b$ 축 방향 에 대하여 추력장치가 발생시킬 추력과 및  $z_b$ 축에 대한 추력모멘트를 계산하기 위해 요구되는 가속도를 선가속도 및 각가속도 계산모듈에서의 출력인  $\dot{u}(n), \dot{v}(n), \dot{r}(n)$ 에서 입력으로 받고, 선박으로부터 측정되어야 하는 정보 u(n), v(n), r(n), Rudder 구동각  $\delta(n)$ , 그리고 선체요목으로부터 계산된 유체 력 미계수를 활용하여 출력인  $X_C(n+1), Y_C(n+1), N_C(n+1)$ 을 구한다.

## 6.2.5 추력장치 추력할당 관련모듈 구성

그림 6.8은 전체 시뮬레이터 구성 중 추력장치 추력할당 모듈과 추력장치가 가 진 한계용량을 설정하는 Saturation 모듈과 실제 추력장치에 근접한 설계를 위한 Dynamics 모듈의 구성이다. 추력장치 추력할당 모듈은 요구추력 생성모듈의 출력 인  $X_C(n+1), Y_C(n+1), N_C(n+1)$ 을 입력으로 받아 MATLAB Function 블록의 actuator.m 파일이 CPP 2개, Side thruster 4개에 추력을 할당한다. 그리고 할당 된 추력은 각 thruster의 한계 출력을 정하고 응답이 느린 실제 추력장치로 근사 하기 위해 모델링된 1차 시스템을 삽입하게 된다.



그림 6.8 추력장치 추력할당 모듈 Fig. 6.8 A thrust allocation module for actuators

## 6.2.6 시뮬레이션 대상 선박 모듈 구성

그림 6.9는 전체 시뮬레이터 구성 중 대상 선박에 대한 모델링과 선박탑재 센서 의 수학모델의 구성에 관한 것이다. 선박에 부착된 각 추력장치로 할당된 추력

 $X_C(n+1), Y_C(n+1), N_C(n+1)$ 에 의해 추력장치들이 추력을 발생시킴으로써 결론적으로 선박 운동이 연속적으로 발생된다.

선박모델로 들어오는  $X_C(n+1), Y_C(n+1), N_C(n+1)$ 을 입력으로 받아 각 각 SIMULINK에서 제공하는 적분기를 이용하여 가속도, 속도, 변위를 구하고 이를 MATLAB Function의 animation.m으로 구현된 프로그램으로부터 해당선박의 운동발 생 시뮬레이션 결과를 가시적으로 확인할 수 있게 한다. 선박탑재 센서의 수학모 델은 실제 선박의 센서를 사용할 수 없는 시뮬레이션 환경이므로 선박운동 발생 을 위해 프로그램 된 MATLAB Function의 mathmodel.m으로부터 출력하여 피드백 한다. 측정되는 변수는  $u(n), v(n), r(n), \psi(n)$ 이고 이 측정변수들은 선가속도 및 각가속도 계산모듈과 요구추력 생성모듈의 입력요소로 피드백 되어 사용된다.



그림 6.9 시뮬레이션 수행을 위한 선박모델 구현 Fig. 6.9 An implementation of the ship model for simulation execution

## 6.3 선박 통합제어시스템을 이용한 선박의 조종성능 확인

### 6.3.1 선박의 기본 이동운동을 통한 통합제어시스템 조종성능 확인

본 논문에서 제안된 선박통합제어시스템의 성능을 확인하기 위하여 대상 선박의 수학모델을 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 선박의 조종운동 추정 결과는 다음과 같다. 그림 6.10은 조이스틱 조작에 의해 선박을 좌측 횡방향으로 만 2m/s로 이동하도록 이동명령을 내렸을 때 10초 간격으로 이동한 결과를 나타 낸 것이다. 수평축은 y,축 이동거리(m)이고 수직축은 x,축 이동거리(m)이다.

전체적으로는 횡방향 이동을 재현함으로써 제안된 선박 통합제어시스템이 타당 하다는 것을 확인할 수 있다. 한편, 제안된 알고리즘에 따라 선박이 좌측 횡방향 으로만 이동할 때에는 회두각은 초기 회두각 0°를 유지하면서 이동해야 하지만 100초 후에는 결과적으로 3.2°의 회두각 변화가 생긴 것을 알 수가 있다.



그림 6.10 제안된 선박 통합제어시스템의 횡방향 이동 시뮬레이션 결과 Fig. 6.10 Simulation result of the proposed integrated control system for translation in sway direction

그 이유는 선박명령 입력변수와 기준 값이 속도로 주어짐으로써, 무게중심의 속 도명령은 점근적으로 추종하였더라도 유체의 관성 및 점성 운동역학적 특성으로 인해 선수나 선미부분의 속도는 변화될 수 있기 때문이다. 따라서 회두각 변화가 생기지 않도록 보정해 주는 알고리즘이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그림 6.11 은 제안된 선박통합제어 알고리즘으로 이동시 내려진 조이스틱 명령 및 생성된 요구추력과 선박운동변수 정보를 획득한 결과이다. 그래프의 수평축은 샘플링 수 (샘플링 시간 0.1초)를 이용한 시간을 나타내고 수직축은 생성된 추력과 운동하 는 선박에 대한 선박정보들을 나타낸다.



그림 6.11 횡방향 이동시 발생한 선박운동 정보 Fig. 6.11 Ship motion information for translation in sway direction

선박 고정좌표계  $x_b$ 축 방향에서의 추력과 속력,  $y_b$ 축 방향에서의 추력과 속력,  $z_b$ 축 회전에 대한 추력모멘트와 회전 각속도, 조이스틱 명령 경사각 θ와 회두각 ψ에 대한 정보를 나타낸다. 그래프에서 가는 선은 명령입력의 속력이고 굵은 선 은 선박에서 발생한 속력이다. 최초 10초가 되는 순간 조이스틱 명령이 가해져 선박운동이 발생하기 시작해서 선박의  $y_b$ 축의 방향으로 추력이 발생하고 v의 속 력이 생기는 것을 볼 수 있다.  $z_b$ 축 회전에 대해서는 이동운동이 발생하는 최초 10초 후에 크진 않지만 추력모멘트가 가해지면서 회전 각속도와 회두각 변화가 발생하고 있다는 것을 그림 6.11의 선박운동 정보에서도 확인할 수 있다.

그림 6.12는 제안된 알고리즘으로 이동명령 시 발생한 추력장치 정보이다. 각각 CPP의 추력과 선미, 선수측 Side thruster에서 발생한 추력을 나타내고 있다.



그림 6.12 횡방향 이동시 추력장치에 할당된 추력 Fig. 6.12 Allocated thrusts of actuators for translation in sway direction

각 그래프의 수평축은 샘플링 수(샘플링 시간 0.1초)를 이용한 시간을 나타내고 수직축은 생성된 각 추력장치에서 발생한 추력정보이다. 횡방향으로의 이동이므 로 CPP의 추력은 0으로 할당되고, 선수측과 선미측의 Side thruster에는 Side thruster의 설치위치를 고려한 크기만큼 제안된 추력할당 알고리즘에 의해 잘 할 당되고 있음을 볼 수 있다.

### 6.3.2 선박의 기본 선회운동을 통한 통합제어시스템 조종성능 확인

그림 6.13은 제안된 알고리즘으로 선박이 선수를 중심으로 시계 방향으로 선회하 도록 명령을 준 것에 대한 시뮬레이션 결과이다. 선수중심에 관한 실선은 선박의 선수중심이 이동한 것을 나타낸 것이다. 수평축은  $y_b$ 축 이동거리(m) 이고 수직축은  $x_b$ 축 이동거리(m)이다. 전체적으로는 선수중심에 대하여 선회가 이루어지고 있음 을 알 수 있다. 하지만 제안된 통합제어 알고리즘에 따라 선박의 선회운동이 이루 어짐에도 불구하고 선박의 선수중심이 횡축으로 약간씩 이동한 결과를 볼 수 있다.



그림 6.13 제안된 선박 통합제어시스템의 선수중심 선회 시뮬레이션 결과 Fig. 6.13 Simulation result of the proposed integrated control system for pure rotation about the axis through bow center

선수중심으로 선회할 때 발생되는  $x_b$ 축과  $y_b$ 축 방향으로의 속도성분을 점근적으 로 0에 수렴하도록 함으로써 선수중심의 이동이 발생하지 않도록 통합제어시스템 의 알고리즘이 구성되어 있음에도 불구하고,  $x_b$ 축과  $y_b$ 축 방향으로의 속도가 결 론적으로 발생하여 선수 중심이 고정되지 않았음을 알 수 있다. 그 이유는 유체 의 운동역학적 특성으로 인해 이미 발생된 선수의 위치변화를 보정해 줄 수 없는 알고리즘의 한계 때문이다.

그림 6.14는 선박이 선수중심으로 선회할 때 생성된 요구추력과 발생한 선박운 동변수 정보이다.



그림 6.14 선수중심 선회 시 발생한 선박정보

Fig. 6.14 Motion information for rotation about the axis through bow center

그래프의 수평축은 샘플링 수(샘플링 시간 0.1초)를 이용한 시간을 나타내고 수 직축은 생성된 선박정보를 표시한 것이다. 그림 6.14로부터 선수 중심 선회 시에  $x_b$ 축의 추력이 0 임에도 불구하고 아주 작지만  $x_b$ 축 방향 속도 u가 발생하고 있 음을 볼 수 있고,  $y_b$ 축 방향으로 선수중심의 이동속도  $v_b$ 가 발생함으로써 결과적 으로 선수중심을 이동시키게 됨을 볼 수 있다.

그림 6.15는 선수중심 선회 시 각 축별로 생성된 추력을 추력장치에 할당한 결 과를 보여 주고 있다. 각 그래프의 수평축은 샘플링 수(샘플링 시간 0.1초)를 이 용한 시간을 나타내고 수직축은 CPP와 thruster의 추력이다. 선미측의 Side thruster뿐만 아니라 선수측 Side thruster에도 추력이 할당되고 있음을 볼 수 있는데 결과적으로 선수중심의 이동을 야기하고 있음을 알 수 있다.



그림 6.15 선수중심 선회 시 추력장치에 할당된 추력 Fig. 6.15 Allocated thrusts of actuators for pure rotation about the axis through bore center

### 6.3.3 오차 보정 알고리즘의 구성

본 논문에서 제안된 선박 통합제어시스템의 선박운동 제어 개념은, 선박이 이동 하거나 선회할 때 원하는 명령운동을 점근적으로 추종하도록 하는 것이었다. 이 를 위하여 명령수행에 필요한 선박운동 변수를 정의하고 운동변수에 대한 기준 값을 계산한 다음 선박이 표출하는 운동변수 값이 기준 값에 점근하도록 알고리 즘을 구성함으로써 전체적으로는 오퍼레이터에 의해 조작된 명령운동과 매우 유 사한 운동을 재현할 수 있음을 확인하였다. 그러나 제안된 통합제어시스템에서는 위치가 아닌 속도오차를 점근적으로 0에 추종시키도록 알고리즘이 구성됨으로써, 회두각 오차나 회전중심의 위치이동이 발생하였음에도 불구하고 이를 보정해 주 는 피드백 알고리즘이 존재하지 않는다. 그 결과 앞서 수행한 시뮬레이션 결과에 서도 볼 수 있듯이 순수이동 운동 시에 발생된 회두각 오차와 순수회전 시에 발 생된 회전중심의 이동을 제거할 수 없었다.

따라서 본 절에서는 회두각 오차나 회전중심의 위치오차가 발생할 경우, 이를 제거할 수 있는 오차 보정알고리즘을 구성한다.



그림 6.16 선박 가속도 및 각가속도 피드백을 이용한 오차보정 알고리즘 Fig. 6.16 Error compensation algorithm through negative feedback of acceleration and angular acceleration of ship

오차보정 알고리즘은, 제안된 통합제어시스템에서 속도오차를 제거하기 위하여

계산되는 요구가속도와 요구 각가속도로부터 위치오차를 보정하기 위한 현재 선박 의 가속도와 각가속도를 계산하여 피드백 함으로써, 선박운동이 명령운동을 추종함 과 동시에 위치오차를 발생시키지 않도록 제어가속도와 각가속도를 생성하는 방법 이다. 이 때 선박의 가속도와 각가속도는 선박으로부터 측정된 선회중심의 이동 위치와 선회 회두각을 샘플링 시간동안 평균 미분함으로써 평균속도와 평균 각속 도를 구한 다음 이를 다시 평균 미분함으로써 구한다. 이를 블록선도로 표현하면 그림 6.16과 같다.

따라서 본 논문에서 제안하는 조이스틱 컨트롤 기반 선박 통합제어시스템의 전 체 구성도는 그림 6.17과 같이 보완된다.



그림 6.17 보완된 조이스틱 컨트롤 기반 선박 통합제어시스템 구성도 Fig. 6.17 A configuration of the compensated integrated control system of the ship based on joystick control

오차보정 알고리즘을 추가하여 보완된 통합제어시스템에서는 제어추력과 제 어추력모멘트를 계산하는 것이 필요하다. 이를 위하여 (4.1)~(4.3)을 토대로 계산알고리즘을 정리하면 식 (6.1)~(6.3)과 같다. 현재 샘플링시간  $nT_{\rm e}$ 에서의 선박운동을 토대로 다음 단계  $(n+1)T_{\rm e}$ 에서 발생 시켜야 할  $x_b$ 축 방향 제어추력  $X_C(n+1)$ 은  $X_C(n+1) = (m - X_{\dot{u}})\dot{u}_c(n) - (m - Y_{\dot{v}})v(n)r(n)$ (6.1)

이고, 
$$y_b$$
축 방향 제어추력  $Y_C(n+1)$ 은  
 $Y_C(n+1) = (m - Y_v)\dot{v}_c(n) - Y_vv(n) - (Y_r - mu(n))r(n) - Y_\delta\delta(n)$  (6.2)

이며, 
$$z_b$$
축 회전방향 제어추력모멘트  $N_C(n+1)$ 은  
 $N_C(n+1) = (I_z - N_r) \dot{r}_c(n) - N_v v(n) - N_r r(n) - N_\delta \delta(n)$  (6.3)

으로 수정된다. 여기서  $\dot{u}_c(n), \dot{v}_c(n), \dot{r}_c(n)$ 은 각각  $x_b$ 축 제어가속도,  $y_b$ 축 제어 가속도,  $z_b$ 축 제어각가속도이다.

(1) 선박의 기본 이동운동을 통한 보완된 통합제어시스템 조종성능 확인



그림 6.18 보완된 선박 통합제어시스템의 횡방향 이동 시뮬레이션 결과 Fig. 6.18 Simulation result of the compensated integrated control system for translation in sway direction

오차보정 알고리즘을 추가함으로써 보완된 통합제어시스템의 성능을 확인하기 위하여 6.3.1절에서 수행한 것과 동일한 시나리오를 이용하여 횡방향 순수이동에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6.18은 새롭게 보완된 선박 통합제어시스템의 알고리즘을 이용하여 시뮬 레이션한 횡방향 순수이동의 결과이다. 제안된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.10에서는 횡방향으로 이동하면서 회두각이 변화하면서 선박이 회전함으로써 명 령운동을 정확하게 재현하지 못하였다.



그림 6.19 보완된 알고리즘 토대로 횡방향 이동시 발생한 선박운동 정보 Fig. 6.19 Ship motion information for translation in sway direction using the compensated algorithm

한편, 보완된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.18에서는 회두각 변화 없이 횡방 향 순수이동만을 재현함으로서 명령운동을 정확히 재현하고 있음을 볼 수 있다.

그림 6.19는 보완된 통합제어시스템을 토대로 횡방향 이동 시 발생한 선박정보를 나타낸 그림이다. 제안된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.11에서는  $z_b$  축에 관한 추력모멘트가 발생하여 결과적으로 회두각 변화가 발생하였으나, 보완된 통합제어 시스템을 사용한 그림 6.19에서는  $z_b$  축에 관한 추력모멘트가 발생하지 않았음을 볼 수 있으며 회두각도 초기 회두각 0°를 잘 유지하고 있음을 볼 수 있다.



그림 6.20 보완된 알고리즘 토대로 횡방향 이동시 추력장치에 할당된 추력 Fig. 6.20 Allocated thrusts of actuators for translation in sway direction using the compensated algorithm

그림 6.20은 보완된 통합제어시스템을 사용하여 횡방향 이동시 추력장치에 할 당된 추력을 보여 주는 그림이다. 제안된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.12 와 유사한 추력할당 결과를 볼 수 있다.

#### (2) 선박의 기본 회전운동을 통한 보완된 통합제어시스템 조종성능 확인

오차보정 알고리즘을 추가함으로써 보완된 통합제어시스템의 성능을 선박의 선 회운동에 대해서도 확인하기 위하여 6.3.2절에서 수행한 것과 동일한 시나리오를 이용하여 선수중심 순수회전에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6.21은 새롭게 보완된 선박 통합제어시스템의 알고리즘을 이용하여 시뮬 레이션 한 선수중심 회전의 결과이다. 제안된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.13에서는 선수중심의 이동으로 인하여 선수중심이 고정되어야 하는 명령운동을 정확하게 재현하지 못하였다. 한편, 보완된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.21 에서는 선수중심의 이동 없이 선수중심에 대한 순수회전만을 재현함으로서 명령 운동을 정확히 추종하고 있음을 볼 수 있다.



그림 6.21 보완된 선박 통합제어시스템의 선수중심 선회 시뮬레이션 결과 Fig. 6.21 Simulation result of the compensated integrated control system for pure rotation about the axis through bow center

그림 6.22는 보완된 통합제어시스템을 토대로 선수중심 회전 시 발생한 선박정보

를 나타낸 그림이다. 제안된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.14에서는  $y_b$  축에 관 한 추력과 선수중심의 속도  $v_b$ 가 발생하여 결과적으로 선수중심의 이동이 발생하였 으나, 보완된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.22에서는  $y_b$  축에 관한 추력이 전혀 생성되지 않았고 선수중심의 이동속도  $v_b$ 도 발생하지 않았음을 볼 수 있다.



그림 6.22 보완된 통합제어시스템의 선수중심 선회 시 발생한 선박정보 Fig. 6.22 Motion information for rotation about the axis through bow center using the compensated integrated control system

그림 6.23은 보완된 통합제어시스템을 사용하여 선수중심 선회 시 추력장치에

할당된 추력을 보여 주는 그림이다. 제안된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.15에서는 선수측 Side thruster에 추력이 할당되어 선수중심의 이동을 야기 하였으나, 보완된 통합제어시스템을 사용한 그림 6.23의 경우에는 선수측 Side thruster에 추력이 전혀 할당되지 않음으로써 선수중심의 이동도 발생하지 않 았으며 선미측 Side thruster에만 추력이 할당되어 선수중심 선회를 발생시키 고 있음을 알 수 있다.



그림 6.23 보완된 통합제어시스템의 선수중심 선회 시 할당된 추력 Fig. 6.23 Allocated thrusts of actuators for pure rotation about the axis through bore center using the compensated integrated control system

## 6.3.4 선박의 복합 운동을 이용한 통합제어시스템의 성능평가

실제 선박운동에 있어 발생할 수 있는 가상의 시나리오를 가정하여 제안된 통합 제어시스템을 토대로 보완된 통합제어시스템의 조종성능을 확인하고자 한다. 복 합운동의 시나리오에 사용된 모드로서는, 이동모드에는 설정속도 모드와 가변속 도 모드가 시나리오에 따라 사용되었으며, 선회모드에는 기본 선회운동에서 사용 된 선수중심 선회를 제외한 무게중심모드와 선미중심모드가 사용되었다.

#### (1) 선박의 복합운동 - 시나리오 1

그림 6.24는 200초에 걸쳐 복합운동을 시뮬레이션 한 선박운동 결과이다. 수평 축은  $y_b$ 축 이동거리(m)이고 수직축은  $x_b$ 축 이동거리(m)이다.



그림 6.24 시나리오 1에 대한 선박운동의 시뮬레이션 결과 Fig. 6.24 Simulation result of ship motion for scenario 1

선박의 복합운동 시나리오 1은 최초 50초 동안에는 모드 1의 설정속도모드로 전 진 속력 0(m/s), 횡방향 속력 2(m/s), 회두각 0°로 이동하고 50초~100초 사이 에는 전진 속력 3.8(m/s), 횡방향 속력 3.8(m/s), 회두각 0°의 모드2로 이동하 고 100초~150초 사이에는 모드3의 설정속도모드로 전진 속력 5.38 (m/s), 횡방향 속력 0 (m/s), 회두각 0°로 이동하고, 150초에서 200초 사이에는 모드8의 무게 중심 선회모드로 전진속력 0 (m/s), 횡방향 속력 0 (m/s), 회두각 90°로 선회하 는 선박운동이다. 시나리오로 입력한 선박운동 명령을 정확히 재현하고 있음을 볼 수 있으며, 따라서 보완된 통합제어시스템은 본 논문에서 가정한 선박의 운동 을 통합적으로 제어하는데 적합함을 알 수 있다.



그림 6.25 시나리오 1 하에서 발생한 선박정보 Fig. 6.25 Ship motion information occurred under scenario 1

그림 6.25는 시나리오 1 운동명령 하에서 생성된 제어추력과 선박으로부터 측정 된 선박운동 변수의 결과이다. 그림에서 가는 선은 명령입력 속도이고 굵은 선은 선박에서 발생한 선박속도를 나타낸다. 최초 50초 상황에는  $y_b$ 축 추력만 발생하 고  $x_b$ 축 추력과  $z_b$ 축에 관한 추력모멘트는 발생하지 않음을 볼 수 있다. 또한 명 령된 횡방향 속도 v의 요구속도 2(m/s)에는 1초 후에 도달하고 있음을 알 수 있 다. 50초에서 100초 사이에는  $y_b$ 축으로 명령된 v 속도를 3.8(m/s)로 추종하기 위 하여 양의 추력을 할당함을 볼 수 있다. 그 때  $x_b$ 축으로도 추력이 할당되어 u의 속도가 3.8(m/s)에 점근적으로 도달한다. 100초에서 150초에는  $y_b$ 축으로 음의 추 력이 할당되어 v가 0(m/s)로 되며 전진속도 u는 5.38(m/s)에 점근적으로 도달한 다.



그림 6.26 시나리오 1 하에서 발생한 추력장치의 추력 Fig. 6.26 Thrusts of actuators generated under scenario 1

150초에서 200초 사이에는 명령된 무게중심 선회모드를 재현하기 위하여  $x_b$ 축으 로는 음의 추력을 가해서 u = 0(m/s)에 도달하게 하며  $z_b$ 축의 추력모멘트를 발 생시켜 목표 회두각인 90°로 선회하도록 함을 볼 수 있다. 그림 6.26은 시나리 오 1 하에서 할당된 추력장치의 추력이다. 각 그래프의 수평축은 샘플링 수(샘플 링 시간 0.1초)이고 수직축은 생성된 각 추력장치에서 발생한 추력이다. 최초 50 초에서는 전진속도만이 발생하기 때문에 CPP의 추력만이 존재하고 50초에서 100 초 사이에는 CPP에서는 음의 추력을 발생되어 전진속도를 0.8(m/s)에 도달하도록 하고 선미 및 선수측 Side thruster에서 발생된 추력은 횡방향 속도를 2(m/s)에 도달하도록 하고 있다. 100초에서 150초에는 CPP에 음의 추력이 발생되어 전진속 도를 0(m/s)에 도달하도록 하고 있다. 150초에서 200초에는 선미, 선수의 Side thruster에 추력을 발생시켜 전진 속력 0(m/s), 횡방향 속도 0(m/s)에 도달하도 록 하고, 무게중심의 선회를 위해 선미측에서는 음의 추력을 선수측에는 양의 추 력을 발생시켜 해당 선박이 무게중심에 관해 선회하도록 한다. 시나리오 1에서를 토대로 시뮬레이션 한 결과 본 논문에서 제안한 설정속도모드에서의 이동과 무게 중심 선회의 타당성을 확인할 수 있다.



그림 6.27 시나리오 2에 대한 선박운동의 시뮬레이션 결과 Fig. 6.27 Simulation result of ship motion for scenario 2

선박의 복합운동 시나리오 2는 최초 50초는 모드4의 가변속도모드로 속력을 가

변하면서 회두각 0°로 이동하고, 50초~100초 사이에는 모드6의 가변속도모드로 회두각 0°을 유지하면서 이동하고, 100초~150초 사이에는 모드5의 가변속도모드 로 속도를 가변하면서 회두각 0°로 이동하는 상황이다. 그림 6.27은 선박의 복 합운동 시나리오 2 하에서 시뮬레이션 한 선박운동의 결과를  $x_b, y_b$  축 평면상에 나타낸 것이다. 그림 6.28에서 보여 주는 추력 및 선박운동변수 정보와 그림 6.29에서 보여 주는 추력장치에서 발생된 추력을 시간에 동기시켜 비교 분석할 때, 그림 6.27의 선박운동 결과는 명령된 선박운동의 시나리오를 잘 추종하고 있 음을 알 수 있다. 특히 시나리오 2는 이동 시 조이스틱의 기울기에 따른 가변속 도 모드를 가정한 경우인데, 이 경우에도 선박은 가변속도를 점근적으로 잘 추종 하고 있음을 확인할 수 있다.



그림 6.28 시나리오 2 하에서 발생한 선박정보 Fig. 6.28 Ship motion information occurred under scenario 2



그림 6.29 시나리오 2 하에서 발생한 추력장치의 추력 Fig. 6.29 Thrusts of actuators generated under scenario 2

#### (3) 선박의 복합운동 - 시나리오 3

선박의 복합운동 시나리오 3은 최초 50초 동안에는 모드 1의 설정속도모드로 전진 방향 속도 0(m/s), 횡방향 속도 -2(m/s), 회두각 0°로 이동하고, 50초~100초 사 이에는 전진속도 -3.5(m/s), 횡방향 속도 -3.5(m/s), 회두각 0°의 모드2로 이동 하고, 100초~160초 사이에는 모드3의 설정속도모드로 전진속도 -2(m/s), 횡방향 속 도 0(m/s), 회두각 0°로 이동하고, 160초에서 210초 사이에는 모드8의 선미중심 선회모드로 회두각 110°로 선회하는 상황이다. 그림 6.30은 선박의 복합운동 시나 리오 3 하에서 시뮬레이션 한 선박운동의 결과를  $x_b, y_b$  축 평면상에 나타낸 것이다.



그림 6.30 시나리오 3에 대한 선박운동의 시뮬레이션 결과 Fig. 6.30 Simulation result of ship motion for scenario 3

그림 6.31에서 보여 주는 추력 및 선박운동변수 정보와 그림 6.32에서 보여 주는 추력장치에서 발생된 추력을 시간에 동기시켜 비교 분석할 때, 그림 6.30의 선박운 동 결과는 연속적으로 명령된 선박운동의 시나리오를 잘 추종하고 있음을 알 수 있 다. 특히 시나리오 3은 선박의 후진과 선미중심 선회모드를 가상한 것으로, 이 경우에도 선박은 명령운동을 점근적으로 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.



그림 6.31 시나리오 3 하에서 발생한 선박정보 Fig. 6.31 Ship motion information occurred under scenario 3



그림 6.32 시나리오 3 하에서 발생한 추력장치의 추력 Fig. 6.32 Thrusts of actuators generated under scenario 3

## 제 7 장 결 론

본 논문에서는 조이스틱과 조그 다이얼을 입력장치로 사용하여 다양한 선박의 운동을 실현하기 위한 선박 통합제어시스템을 제안하였다. 이 때 선박이 이동과 회전 등 다양한 운동을 재현할 수 있도록 선수측 및 선미측에는 Side thruster를 각각 2대씩 설치하고 선미에는 2대의 CPP를 설치하는 것으로 가정하였다.

선박의 통합제어시스템을 구성하고 그 성능을 검토하기 위하여 본 논문에서 연 구한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 조이스틱과 조그 다이얼을 이용하여 오퍼레이터에 의해 조작된 선박 운동
   명령이 어떤 운동명령인지를 인식하는 알고리즘을 정립하였다.
- 조이스틱에 의한 이동명령 시 조이스틱 경사방향 θ에 따른 선박의 이동방향을 모든 방향에서 결정할 수 있도록 하였고, 조이스틱의 기울기 ζ값을 활용하여 선박의 이동속도 크기를 가변시키도록 설정함으로써 선박운동의 명령입력 기준 값을 설정하는 알고리즘을 정립하였다.
- 조그 다이얼에 의한 선회명령 시 선수중심 선회, 무게중심 선회, 선미중심 선회모드를 운동학적으로 정립하였고, 무게중심 선회뿐만 아니라 선수중심과 선미중심 선회 시에도 선회중심의 이동 없이 선회만 하도록 운동축의 운동변 수 기분 값을 계산하는 알고리즘을 정립하였다.
- 오퍼레이터 조작명령에 따른 선박운동을 실현하기 위하여 조작명령에 따라 계산되는 운동변수 기준 값을 점근적으로 추종하도록, 현재 선박의 운동변 수 값과 운동변수 기준 값을 이용하여 운동 축별로 발생시켜야 하는 요구가 속도 및 요구 각가속도를 계산하는 알고리즘을 정립하였다.
- 모델링된 3차원 비선형 조종운동방정식을 기반으로 계산된 요구가속도 및 요구 각가속도, 현재 선박의 운동변수 값을 활용함으로써 내려진 운동명령 을 실현하는데 필요한 운동축 별 요구추력과 추력모멘트를 매 샘플링 주기 마다 계산하는 알고리즘을 정립하였다. 이 때 선체주변의 유체에 의한 유체 관성력과 유체점성력을 극복하고 운동축 별로 선박이 발생시켜야 하는 가속 도 및 각가속도를 반영하여 계산되도록 알고리즘을 구성하였다.

- 운동 축별로 계산된 요구추력과 추력모멘트를 선박에 설치된 여러 개의 추 력장치가 통합적으로 발생시키도록 하기 위하여 선박에 설치된 모든 추력장 치에 추력을 배분하는 추력할당 알고리즘을 정립하였다.
- 제안된 선박 통합제어시스템의 타당성과 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이 터를 구성하였다. 오퍼레이터 조작명령을 입력하는 장치로는 실제의 조이스 틱과 조그 다이얼을 사용하였으며, 대상선박 모델과 통합제어시스템의 모든 알고리즘은 MATLAB 언어와 SIMULINK를 사용하여 구성하였다.
- 구성된 시뮬레이터를 이용하여 선박의 조종운동 중에서 기본이 되는 이동운 동과 선회운동에 대해 시뮬레이션을 수행함으로써 제안된 통합제어시스템의 타당성과 성능을 먼저 평가하였다. 그 결과 운동명령에 해당하는 선박운동 을 전체적으로는 재현함으로써 통합제어알고리즘의 타당성은 입증할 수 있 었으나, 이동시 회두각의 변화가 발생하고 선회 시 선회중심이 이동하는 등 보완해야 할 문제점이 발생하였다.
- 발생된 문제점을 해결하기 위하여 현재 선박의 운동 가속도와 각가속도를 피드백하여 제어가속도와 제어 각가속도를 생성하는 오차보정 알고리즘을 정립하였으며 이를 토대로 보완된 선박 통합제어시스템을 완성하였다.
- 선박의 기본 조종운동인 순수이동과 순수회전에 대하여 보완된 통합제어시
   스템의 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과 회두각 변화 없이 이동하였고 선
   회중심 이동 없이 선회함을 확인하였다.
- 선박의 다양한 이동운동과 선회운동을 연속적으로 복합한 선박운동 명령의 시나리오를 구성하여 보완된 선박 통합제어시스템의 성능을 최종적으로 검 증하였으며 그 결과 명령운동을 점근적으로 잘 추종함을 입증하였다.

본 연구에서는 실제 선박이 아닌 수학모델을 대상선박으로 사용하였고 선박운 동 변수의 측정도 오차 없이 측정된다고 가정하였으며 추력장치의 동역학도 1 차 모델로 근사하여 사용하는 등, 실제의 선박 환경과는 많은 차이가 존재하는 시뮬레이터를 대상으로 선박 통합제어시스템의 성능을 평가하였으나, 시뮬레이 션으로부터 얻어진 결과는 정성적인 관점에서 볼 때 실제의 경우에도 유효하리 라 사료된다.

# 참고문헌

 T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.

[2] T. I. Fossen, *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics, 2002.

[3] 이병결, "선박의 자동 항행을 위한 최적 항로 결정과 LOS 가이던스 시스템," 한 국해양대학교, 박사논문, 2005.

[4] 이병결, 김종화, "적응 퍼지 방식을 이용한 선박 자동 항로 추적제어에 관한 연 구," Proceedings of the 14th Korea Automatic Control Conference, 1999.

[5] 이병결, 김종화, 김대영, 김태훈, "유전 알고리즘을 이용한 선박의 최적 항로 결정 에 관한 연구," Proceedings of the 15th Korea Automatic Control Conference, 2000.

[6] 손경호, 김용민, "시뮬레이터 구축을 위한 2축 2타 선박의 조종운동 수학모델에 관한 연구." 해양환경.안전학회지, 제7권, 제3호, 통권 제15호, 2001.

[7] 서상현, 송용규, "Auto-pilot 시스템에 적용되는 제어 알고리즘에 대하여," 대한 조선학회 논문집, 제 31권, 제 2호, 1994.

[8] 김종화, 임재권, 최병훈, "Ship Joystick Control System 개발", (주)KTE 연구보 고서, 2009.

[9] 손경호, 선박조종 제어론, 한국해양대학교 pp. 202~214, 1999.

[10] Minorsky, "Automatic Steering," the 13th Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1922.

[11] T. I. Fossen, "Recent Development in Ship Control Systems Design," World Superyacht Review, Sterling Publication Limited, 1999.

[12] 손경호, 이승건, 하승필, "MANTA 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델 및 조종응 답 특성," 대한조선학회논문집, 제43권, 제4호, 2006.

[13] 이병결, 김종화, "선박 자동항로 추적을 위한 회두각 명령의 생성과 적응 퍼지제 어," 박용기관학회지, Vol. 25, No. 1, pp. 199~208, 2001.

[14] 강철구, 권인소, 윤중선, 정완균 역, 로봇동역학과 제어, 희중당, 1994.

[15] 이석규, 도용태, 박창용, 최재원 공저, *로봇공학의 이해*, 사이텍미디어, 2008.

[16] Kstsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, 2003.