



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

자율운항시스템 개발을 위한
선박 운동제어에 관한 연구



2019년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

김 경 현

공 학 박 사 학 위 논 문

자율운항시스템 개발을 위한
선박 운동제어에 관한 연구

지도교수 고 대 권

이 논문을 박사학위논문으로 제출함.



2019년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

김 경 현

김경현의 공학박사 학위논문을 인준함.

2019년 8월



위원장	공학박사	정 석 호 (인)
위원	공학박사	김 영 복 (인)
위원	공학박사	류 지 열 (인)
위원	공학박사	옥 수 열 (인)
위원	공학박사	고 대 권 (인)

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구 현황 및 기술 개발 관련	2
1.3 연구 목표	4
제 2 장 선박운동제어 기초이론	7
2.1 좌표계와 변수	7
2.2 선박의 수학적모델 표현법	7
2.2.1 전통적인 모델 표현법	9
2.2.2 Fossen의 벡터모델 표현법	9
2.3 6차원 비선형 선박모델	10
2.3.1 SNANME 표현	11
2.3.2 6차원 강제 운동방정식의 벡터 표현	12
2.4 유체동역학적 힘과 모멘트를 고려한 선박의 운동방정식	14
2.4.1 부가질량력과 모멘트	16
2.4.2 유체동역학적 감쇠	19
2.4.3 복원력과 모멘트	21
2.5 3차원 비선형 선박모델	22
제 3 장 선박운동제어계 설계	24
3.1 서론	24

3.2 제어대상 모델링	24
3.3 파라미터 동정	27
3.4 PID 제어기법에 의한 선박운동제어 시뮬레이션	33
3.5 최적제어이론에 의한 선박운동제어 시뮬레이션	37
3.6 결론	46
 제 4 장 실험 및 평가	47
4.1 서론	47
4.2 실험장치	47
4.2.1 실험용 선박	47
4.2.2 제어계측 시스템	48
4.3 제어계 설계	51
4.4 실험 결과 및 평가	53
4.5 결론	60
 제 5 장 결 론	61
참 고 문 헌	63

A Study on Ship Motion Control System Design
for Developing Autonomous System

Kyong-Hyon Kim

Department of Mechanical System Engineering, the Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Control and measurement engineering technologies are applied to all industrial fields and being used conveniently. These technologies can reduce human error and allow us to work safely and maximize ease of use. In the case of automobiles, semi-autonomous driving technology has been developed for a while, allowing us to leave our hand.

In recent years, autonomous driving is also in the commercialization stage in complex roads, front-collision prevention systems and highways.

It has been a long time since this effort has been made to apply such control technology to marine vessels. Control techniques aimed at tracking trajectory routes in offshore marine environments have begun to be applied to ship systems since the early 1990s. The route tracking problem was the main point of view when the ship speed was low. This autonomous operation is possible at sea, thereby alleviating the fatigue of the sailors and improving the

work environment. Unmanned ship operation technology capable of autonomous operation at sea was applied to small ships and special purpose ships (military object). As a result of continuous efforts for developing technologies is becoming a reality to apply unmanned technology such that the commercial vessel can maximize operational efficiency.

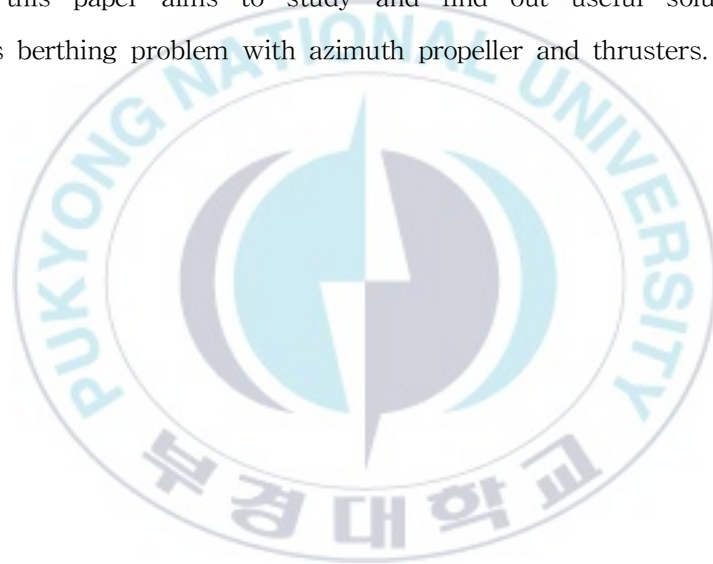
For an example, in developed countries such as Norway and Finland, container test ship is being designed for practical use of unmanned technology, and a verification plan for actual sea areas is being established. In order to put the autonomous navigation and unmanned technology into practical use, it is necessary to measure and analyze the control technology by considering ship and marine environment conditions in real time. In order to operate the vessel safely, collision avoidance technology is necessary in addition to measurement technology, but an algorithm that identifies and corrects the physical characteristics of the ship in real time is also necessary. By fusing and optimizing other related technologies, it will be possible to operate autonomous ships more efficiently and safely. To become a fully autonomous vessel, automated ship berthing technology must be accompanied.

A variety of studies have been carried out on the autonomous ship berthing. A multivariable neural controller design method for ship berthing has been suggested by using a multilayer feedforward neural network. This neural controller is designed to adjust parameters online to maintain robust control performance even under the effects of environmental disturbances. A typical example of research results about ship motion control relates to construction of a ship motion control system with four azimuth propellers. Although it is evaluated as the leading research result and utilized as DPS (Dynamic Positioning System) for special purpose ships such as FPSO and drill ship rather than general ship.

The previous research results are not theoretical approaches but methods for

attempting to connect the main propulsion unit and the rudder control only. In the previous researches, the target is to follow the established route under the environment conditions. Also, the change of the hydraulic force characteristics between the quay wall and the ship were not considered as approaching the quay wall.

Autonomous vessels must perform all the processes from departure to berthing independently without external assistance. However, the berthing operation can not be accomplished only by the simple path following technique. Therefore, this paper aims to study and find out useful solution on the autonomous berthing problem with azimuth propeller and thrusters.



Nomenclature

$O(x_0, y_0)$	:	공간고정좌표계
$G(x, y)$	:	선체고정좌표계
m	:	선체질량
I_z	:	선체의 z 방향 관성모멘트
X_u, Y_v, Y_v, Y_r	:	부가질량
N_v, N_r	:	부가관성모멘트
u, v	:	x, y 방향 속도성분
ψ	:	선수방위각
T_P	:	아지무스 프로펠러 추력 (주추진장치 추력)
N, T	:	아지무스 프로펠러의 직압력 및 평행력
T_B	:	바우 스텔러 추력
T_S	:	스텐 스텔러 추력
L_B, L_S, L_R	:	각 스텔러(바우, 스텔) 및 주추진장치 중심에서 선박무게 중심까지 거리
δ	:	주추진장치 회전각도 (타각도)
$\Delta u, \Delta v, \Delta r$	:	정의되지 않는 불확실성 (외란, 파라미터 불확실성 등)
e	:	상태 오차 벡터
I	:	단위 행렬
L	:	관측기 이득 행렬
P	:	양 정치 대칭 행렬
τ	:	제어 입력 힘과 모멘트

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

제어 계측 공학 기술은 모든 산업 분야에 적용 되어 자동화 수준을 향상 시키는데 지대한 공헌을 하였다. 이러한 기술의 활용으로 인간의 실수를 줄여 안전하게 작업할 수 있게 하고 편의성을 극대화 할 수 있게 되었다. 자율 주행 자동차 등이 그 일례이며, 복잡한 도로에서의 안전한 주행 뿐만 아니라 고속도로에서의 자율주행이 가능할 정도로 기술 수준이 향상되었다.

미국의 경우, 이미 고속도로에서 반자율주행 기능으로 승용차 운전이 가능한 실정이다. 이러한 제어 기술을 해상에서 운용되는 선박 등에 적용하고자 하는 노력은 이미 오래전부터 추진되었다. 그러나 해상에서 자율운항이 가능한 무인화선박운용기술은 소형선 및 특수 목적용(군용) 선박에 한정되어 있고, 상용 선박에 대해서는 파일럿의 피로도를 경감시켜 근무환경을 개선시켜주기 위한 지원기술 정도로 활용되어져 왔다.

끊임없는 기술개발 노력의 결과로 상용선박에도 무인화기술을 적용하여 운용효율성을 극대화 하려는 시도가 이제는 현실로 다가오고 있다. 예를 들어 노르웨이 등 선진 외국에서는 시험수조에서의 수많은 테스트를 거쳐 실용화를 위한 기술개발을 완료하고, 무인화기술의 상용화를 위한 단계로, 컨테이너 시험선을 설계하고 실 해역 검증계획을 추진 중이다.

조선분야에서 세계시장을 선도하고 있는 우리나라는, 건조기술에 제한된 조선 기술력의 한계에 따른 근원적인 문제점을 이미 인지하고 있다. 이러

한 한계를 극복할 수 있는 새로운 혁신기술을 기반으로 한 원천기술 확보 노력이 지속적으로 요구되고 있다.

자율운항기술에 관한 시대적 요구는 우리에게도 새로운 기술을 기반으로 한 조선강국으로서의 입지를 굳건하게 다질 수 있는 기회가 될 수도 있다. 그럼에도 불구하고, 국내기술수준은 이에 부응할 만한 어떠한 준비와 도전도 시도하고 있지 않고 있는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 현실적으로 선진기술을 압도할 수 있는 경쟁기술 개발이라는 무리한 시도보다는, 틈새기술이라 할 수 있는 접안기술개발에 초점을 맞추고 있다.

즉, 예를 들어, 자율운항선박을 포함한 모든 선박이 항구에 입항해서 정박이 완료되는 시점까지의 안전성과 신속성을 보장할 수 있는 기술은 반드시 필요하다. 항만을 벗어난 운항환경에서의 자율운항기술과 달리, 항내로 진입 후 안벽까지 이동하는데 필요한 자동운항기술은 엄밀히 다른 수준의 기술이 요구된다. 이때에는 정교한 선박운동을 위한 선박운동특성, 안벽과 선박 간에 작용하는 물리특성의 명확하고 세밀한 해석을 통해 안전한 접안 작업이 가능하게 된다. 이와 같은 현실적인 문제는 반드시 해결되어야 완전한 자율운항시스템기술 개발이 가능하고 실용화가 완성될 수 있을 것이다.

1.2 연구현황 및 기술 개발 관련

1970년대 후반까지는 대양을 향해 중인 선박들은 본선의 정확한 위치를 실시간으로 알 수 없었다. 따라서, 선박운동제어에 관한 연구는 러더 각 조

종으로 선수각을 추종해가는 자동조타, 즉 침로유지(course keeping)에 관한 것들 이었다[1-4]. 1980년대부터는 GPS와 같은 항해장비가 개발되어 선박에 장착되었다. 본선의 위치정보를 정확하게 알 수 있었기 때문에 바람이나 조류와 같은 외란 때문에 생기는 위치의 오차를 수정하며 경로를 추종해 가는 항적 유지(track keeping)에 관한 선박운동제어연구가 많이 이루어졌다. 그러나 주행속도 변화가 작거나 거의 일정한 속도에서의 경로 제어 문제가 주된 이슈였다. 항적유지와 같은 주제는 대양에서 항해나 조업을 하는 선박의 특성상 중요한 문제이기에 지금까지도 계속 연구되고 있다[5-8].

1990년 계속된 항해 장비 개발과 인공위성 기술의 발전으로 선박의 자동 접안에 관한 다층 피드 포워드 뉴럴(Neural) 회로망을 사용하여 자동으로 선박을 접안하기 위한 다 변수 뉴럴 제어기 설계방법이 처음으로 제시되었다[9-11].

이 뉴럴제어기는 환경 교란의 영향 아래에서도 강인한 제어성능을 유지하기 위해 파라미터를 온라인으로 조정하도록 설계되었다. 이후 선박 접안에 관한 다양한 이론 및 응용기술에 관한 연구가 진행되었고 각각은 차별화된 전력과 내용을 주장하고 있다[12-15].

한편 Fossen [16]은 4기의 아지무스 추진장치(azimuth type propeller)를 갖는 선박운동제어시스템을 구축하여 선박운동제어 선도적인 연구로 평가받고 있다. 그러나 해당 연구결과는 일반선박 보다는 FPSO, 드릴쉽 등 특수 목적선의 자기위치유지시스템(DPS : Dynamic Positioning System)으로 활용되고 있고 다양한 DPS 시스템에 관한 연구도 계속되고 있다[17-21].

이론적 접근 방법이 다르지만 주추진장치와 러더 제어만으로 자동접안을 완성하려는 시도도 있었다[22-26]. 위의 선행연구 결과는 외항에서와 같이 항내에서도 경로를 설정하여 미리 설정된 경로를 추종하도록 하는데 제어

목표를 두고 있다. 그러나 대부분은 접안지점에 다른 선박이 접안해 있지 않은 단순한 상황을 전제로 하고, 접안루트를 설정한 후 일방적으로 접근해 가는 문제를 다루고 있다. 전용 항만이 아닌 경우 이러한 환경은 거의 존재하지 않는다. 또한 선박이 안벽으로 접근함에 따라 선박과 안벽사이에는 복잡한 형태의 유체력이 작용하여 정교하게 선박운동을 제어하기가 어렵다. 따라서 최종접안 단계에서 터그보트 및 펜더 등의 도움이 필요한 것이 현실이다. 이러한 상황을 고려한 연구결과도 보고되어 있다[27-33]. 또한 로우프 등의 장력제어를 통해 선박 및 수상구조물의 위치제어에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다[34-37]. 이러한 연구는 접안을 위한 선박운동 제어시스템 구축에 필요한 기반이 된다. 대형선박에 비해 상대적으로 운동 제어가 용이한 중소형 선박의 경우에는 사이드 스러스터 등의 부가적인 장치를 활용하여 조종성능을 극대화시킴으로써 무인화 운전이 가능하다. 두기의 사이드 스러스터를 이용한 접안방법에 대한 연구결과도 있으나, 이것은 최종접안단계에서 평행이동만으로 작업을 완료하는 것으로, 접안을 위한 완성된 운동모델을 제시하지 않았고 실제 접안환경 등을 고려하지도 않았다[38]. 이와 같이 안전하고 신속한 접안을 위한 문제를 해결하기 위해 많은 노력이 지금까지도 지속되고 있다.

1.3 연구 목표

일반적으로 선박이 출항 한 후 항해를 거쳐 완전한 접안이 완성되기까지의 과정은 크게 세 가지 형태로 구분할 수 있다. 즉, 항만을 벗어나는 이안, 경로추종이 주가 되는 항해, 그리고 접안이다. 특히 접안은 외항에서의

항해과정과는 완전히 다른 개념으로 접근해야 한다. 접안시작에서 완료까지의 이동구간은 짧으나 터그보트 등의 지원이 반드시 필요하며, 상대적으로 긴 시간이 소요되고 충돌 등 안전사고 위험이 높다. 자율운항선박은 외적 도움 없이 출항에서 접안까지의 모든 과정을 독립적으로 수행해야 하므로, 단순 경로추종기술만으로는 목적달성이 불가능하다. 특히 선박이 접안을 위해 진입하는 항내 환경은 외항에서의 운항환경과 확연히 다르다. 상대적으로 얕은 항내 수심과, 선박이 안벽으로 접근하면서 발생하는 안벽과 선박간의 유체력 특성변화는 예측이 어려울 정도로 복잡하여 접안작업을 어렵게 한다. 이러한 복잡한 환경변화에 적극적으로 대응하고 안전한 접안을 실현하기 위해서는 선박자체에 새로운 기술을 도입함으로써 그것이 가능하게 되었다. 대표적인 기술이 사이드 스러스터 및 아지무스 추진장치이다. 본 연구에서는 자율운항선박시스템 구축을 위한 핵심기술의 하나로서, 복잡한 항만에서 안벽까지 안전하고 신속하게 접안하기 위한 선박운동제어 시스템 구축문제이다.

GPS 활용기술의 고도화와 정보통신기술의 발전이 자율운항선박의 운항을 가능하게 해주고 있다. 정보통신분야에서는 세계적 기술역량을 보유한 우리로서는 충분히 도전해 볼 만한 분야이며, 미래에는 글로벌 경쟁력을 갖춘 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대한다. 이를 위해서는 정보통신기술뿐만 아니라, 선박운동제어에 관한 기본기술을 반드시 확보해야 한다. 예를 들어 자율운항을 위한 기본은 선박운동제어기술이다. 그러나 사소한 기술까지 선진해외기술이 주도하고 있는 것이 현실이다. 그래서 저자들도 선박운동제어에 관한 다양한 연구를 수행하고 있다. 특히 복잡한 항만에서 안전한 접안을 위한 선박운동제어 및 관련기술을 개발하기 위해 지속적으로 노력하고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존연구의 연장선에서 이미 수행한 시뮬레이션결과[39-41]를 기반으로, 선박모델을 제작하고 이를 이용한

실험연구를 진행 한다. 해당선박에 대한 물리특성은 실험을 통해 분석하여 수식모델을 구축하고 모델에 표현된 파라미터를 추정하고, 이를 기반으로 제어기를 설계하여 실험을 통해 경로추종성능 등 자율운항 선박이 갖추어야 할 운동제어성능을 평가 하고자 한다.



제 2 장 선박운동제어 기초이론

2.1 좌표계와 변수

Fig. 2-1과 Table 2-1는 선박 운동에 관련된 좌표계와 변수를 나타낸 것이다. $x_b y_b z_b$ 좌표계의 원점은 선박의 무게중심 G 에 고정되며, 선박과 함께 운동하는 운동좌표계이다. 이는 선박운동의 주요 변수를 나타내는 데 사용된다. X, Y, Z 는 x_b, y_b, z_b 방향에 대한 힘을 나타내고, K, M, N 은 x_b, y_b, z_b 축에 대한 모멘트를 나타내며, u, v, w 는 x_b, y_b, z_b 방향에 대한 선속도, p, q, r 은 x_b, y_b, z_b 축에 대한 각속도를 나타낸다. x, y, z 와 ϕ, θ, ψ 는 각각 x_b, y_b, z_b 축의 위치와 각도이다[42].

2.2 선박의 수학모델

선박의 수학모델은 전통적인 모델 표현과 로봇 동역학에서 유도된 벡터모델 표현이 있다. 선박의 운동방정식 중 정역학을 이용하여 정박 중이거나 정속 항해하는 선체의 평형점을 묘사하고, 동역학을 이용하여 가속되는 선체의 운동을 묘사한다. 부력은 선체의 안정도를 분석하는데 쓰이고 동역학적 선체 해석에서 힘과 모멘트는 뉴턴 역학과 오일러 정리에 의해 해석한다.

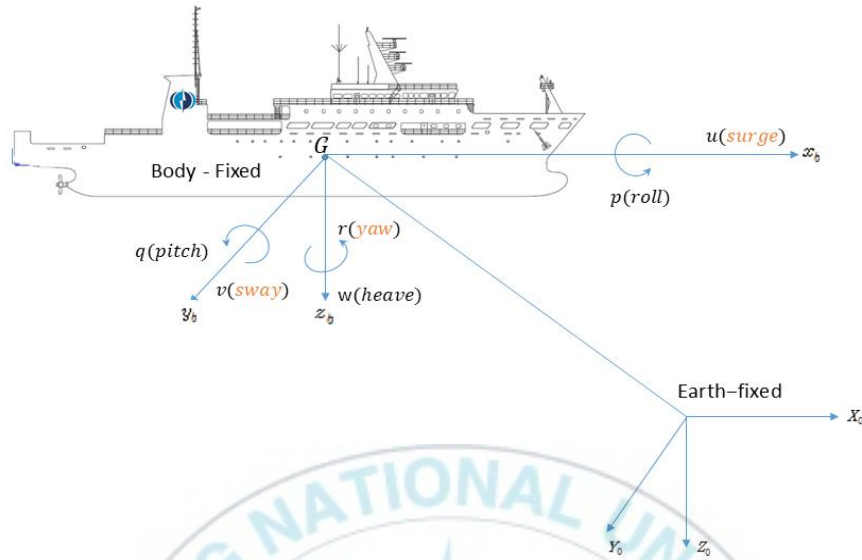


Fig. 2-1 Reference frames and notation of marine craft

Table. 2-1 The notation of SNAME for marine vessel

DOF	Description	Forces and moments	Linear and angular velocities	Positions and Euler angles
1	Motion in the x_b direction (surge)	X	u	x
2	Motion in the y_b direction (sway)	Y	v	y
3	Motion in the z_b direction (heave)	Z	w	z
4	Rotation about the x_b axis (roll, heel)	K	p	ϕ
5	Rotation about the y_b axis (pitch, trim)	M	q	θ
6	Rotation about the z_b axis (yaw)	N	r	ψ

2.2.1 전통적인 모델 (SNAME 모델)

식 (2-1)은 뉴턴의 법칙과 오일러 공식을 이용하여 선박운동을 표현한 것이다.

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau_H + \tau_P + \tau_R \quad (2-1)$$

M_{RB} 는 강체 동역학적 관성 행렬, C_{RB} 는 강체 동역학적 코리올리스와 구심력 행렬, $\dot{\nu} = [\dot{u} \dot{v} \dot{w} \dot{p} \dot{q} \dot{r}]^T$ 는 선가속도 및 각가속도 벡터, 선속도 및 각속도 벡터 $\nu = [uvw pqr]^T$ 로 나타낸다. τ_H 는 선체의 유체동역학적 힘과 모멘트, τ_P 는 추진기의 유체동역학적 힘과 모멘트, τ_R 은 러더의 유체동역학적 힘과 모멘트이다.

2.2.2 Fossen의 벡터모델

Fossen은 식 (2.2)을 이용한 로봇 모델로부터 선박 운동의 벡터 모델 식 (2-3)을 유도하였다. 이는 전통적인 모델 표현에서 고립된 효과에 대해 연구할 수 있는 유체동역학적 모델에 사용된다. 그리고 벡터 모델은 선체 제어 시스템 설계의 표준 모델이며, 국제협회에서 채택되어 사용되고 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (2-2)$$

여기에서, q 는 조인트 앵글 벡터, τ 는 토크, $M(q)$ 는 관성행렬, $C(q, \dot{q})$ 는 코

리올리스 행렬이다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (2-3)$$

여기서, $\nu = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ 는 선속도와 각속도 벡터, $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ 는 위치와 오일러 각이다. 또한, M 은 관성행렬, $C(\nu)$ 는 코리올리스 및 구심력 행렬, $D(\nu)$ 는 감쇠행렬, g 는 복원력 항(중력과 부력 및 모멘트 행렬), τ 는 외력 행렬이다.

2.3 6차원 비선형 선박모델

식(2-4)는 6차원 비선형 선박모델의 벡터모델 표현을 나타낸 것이다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + g_0 + w \quad (2-4)$$

여기에서 M 은 관성행렬, $C(\nu)$ 는 부가질량을 포함한 코리올리스 및 구심력 행렬, $D(\nu)$ 는 점성 행렬, $g(\eta)$ 는 중력과 복원력 항, τ 는 제어입력 벡터, g_0 는 밸러스트 제어에 사용되는 벡터, w 는 바람, 파도 및 조류와 같은 외란 벡터이다. 밸러스트 제어에 사용하는 g_0 를 무시하면 식 (2-5)와 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + w \quad (2-5)$$

선박운동은 선체의 강체운동에 대한 강체동역학적 힘, 모멘트와 유체운동에 대한 유체동역학적 힘, 모멘트로 나누어 생각할 수 있다.

2.3.1 SNANME 표현

선체의 강체동역학적 운동방정식을 기술하기 위해서 SNAME 표현법을 이용하여 운동방정식의 변수를 정의한다.

$$f_0 = [X \ Y \ Z]^T \quad \text{외력}$$

$$m_0 = [K \ M \ N]^T \quad \text{모멘트}$$

$$V_1 = [u \ v \ w]^T \quad \text{선속도}$$

$$V_2 = [p \ q \ r]^T \quad \text{각속도}$$

$$r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T \quad \text{무게중심}$$

뉴턴 역학과 오일러 정리를 이용하여 힘과 모멘트에 관한 선박의 6차원 강체운동 방정식을 스칼라 형태로 표현하며 식 (2-6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vq - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_x \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
 + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned} \tag{2-6}$$

여기에서, I_x, I_y, I_z 와 $I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} = I_{zy}$ 는 원점에 대한 관성행렬 I_0 의 요소이다.

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad I_0 = I_0^T > 0 \quad (2-7)$$

I_x, I_y, I_z 는 각각 x_b, y_b, z_b 축에 대한 회전 관성모멘트이고, $I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} = I_{zy}$ 는 관성적이다. 식 (2-6)은 병진운동과 회전운동을 표현한 것이다.

2.3.2 6차원 강체 운동방정식의 벡터 표현

식 (2-6)를 벡터 표현으로 바꾸면 식 (2-8)와 같다.

$$M_{RB} \dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau_{RB} \quad (2-8)$$

여기서,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & 0 & mx_G & 0 \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yz} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad (2-9)$$

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$\begin{bmatrix} -m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_y p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y & I_{xz}r + I_{xy}q - I_y p & 0 \end{bmatrix}$$

이고 $\nu = [uv\omega pqr]^T$ 는 선속도 및 각속도 벡터, $\tau_{RB} = [XYZKMN]^T$ 는 외력 및 모멘트 벡터이다. 선체 고정좌표계의 원점을 선택함에 따라 선박의 6차원 강체 운동방정식은 간략화 할 수 있다.

1) 원점을 $y_G = 0$ 선택(선박 좌우현 대칭)

일반적인 선박은 좌현, 우현이 대칭되는 구조이며, 강체동역학적 선박 운동방정식은 식 (2-11)과 같다.

$$M_{RB} \dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau_{RB} \quad (2-11)$$

여기서,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & 0 & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_x & 0 & -I_{zx} \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & -I_y & 0 \\ 0 & -mx_G & 0 & I_{zx} & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$C_{RB}(v) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(z_G r) & m(w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) - m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) & \\ m(x_G r + v) & m(-u) & -m(x_G p) \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$\begin{bmatrix} m(z_G r) & -m(x_G q - w) - m(x_G r + v) \\ -m(w) & m(z_G r + x_G p) & m(u) \\ -m(z_G p - v) - m(z_G q + u) & m(x_G p) \\ 0 & -I_{xz} p + I_z r & -I_y q \\ I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r + I_x p \\ I_y q & I_{xz} r - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

이다.

2.4 유체동역학적 힘과 모멘트를 고려한 선박의 운동방정식

강체에 작용하는 유체동역학적 힘과 모멘트에 대해 선형적으로 중첩되는 것으로 가정할 수 있다. 유체동역학적 힘과 모멘트는 선박 운동에 따른 방사유도력, 바람, 파도 및 조류 등의 외란으로 구분된다. 이중 방사유도력과 모멘트는 다음과 같은 요소로 표현된다.

- 1) 선체 주변 유체의 관성에 대한 부가질량력
- 2) 생성된 표면파에 의하여 상실되는 에너지에 대한 포텐셜 감쇠력(조파 감쇠력)
- 3) 아르키메데스의 원리에 대한 복원력

방사유도력과 모멘트에 대해 부가질량력과 모멘트, 포텐셜 감쇠력, 복원력으로 표현하면 식(2-14)와 같다.

$$\tau_{RI} = -M_A \dot{\nu} - C_A(\nu)\nu - D_p(\nu)\nu - g(\eta) + g_0 \quad (2-14)$$

포텐셜 감쇠 이외에 표면 마찰과 파도 조류에 의한 감쇠 및 와류에 기인한 감쇠 등을 고려할 수 있다. 이러한 감쇠력 성분을 정리하면 (2-15)와 같다.

$$D(\nu) := D_p(\nu) + D_s(\nu) + D_w(\nu) + D_M(\nu) \quad (2-15)$$

여기서, $D_p(\nu)$ 는 포텐셜 감쇠, $D_s(\nu)$ 는 표면 마찰에 의한 감쇠, $D_w(\nu)$ 는 파도 조류에 의한 감쇠, $D_M(\nu)$ 는 와류에 의한 감쇠이다. 식 (2-15)과 식 (2-14)을 정리하면, 유체동역학적 힘과 모멘트는

$$\tau_{HD} = -M_A \dot{\nu} - C_A(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\eta) + g_0 \quad (2-16)$$

이 되며, 유체동역학적 힘과 모멘트를 고려하여 선박의 운동방정식은

$$M \dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau_{ext} + g_0 \quad (2-17)$$

가 된다. 여기서, $M = M_{RB} + M_A$, M_A 는 유체동역학적 부가질량력과 모멘트 행렬, $C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu)$, $C_A(\nu)$ 는 유체동역학적 코리올리스와 구심력 행렬, 그리고 $\tau_{ext} = \sum \tau_i$ 는 추력장치의 추력 및 모멘트의 합력이다.

2.4.1 부가질량력과 모멘트

부가질량력과 모멘트는 강제 조파운동과 관련있으며, 인가된 힘과 180도의 위상차를 가지는 압력 유도력과 모멘트이다. 물 속에 잠긴 수중운동체는 부가질량 계수가 일정하며, 파도의 주파수에 대해서 독립적으로 가정될 수 있다. 이 가정 하에, 유체 운동에너지 T_A 는 선체 고정좌표계의 속도 벡터의 제곱 형태로 표현된다.

$$T_A = \frac{1}{2} \nu^T M_A \nu \quad (2-18)$$

여기서, M_A 는 6×6 부가질량항의 시스템 관성 행렬이다.

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \triangleq - \begin{bmatrix} \dot{X}_u & \dot{X}_v & \dot{X}_w & \dot{X}_p & \dot{X}_q & \dot{X}_r \\ \dot{Y}_u & \dot{Y}_v & \dot{Y}_w & \dot{Y}_p & \dot{Y}_q & \dot{Y}_r \\ \dot{Z}_u & \dot{Z}_v & \dot{Z}_w & \dot{Z}_p & \dot{Z}_q & \dot{Z}_r \\ \dot{K}_u & \dot{K}_v & \dot{K}_w & \dot{K}_p & \dot{K}_q & \dot{K}_r \\ \dot{M}_u & \dot{M}_v & \dot{M}_w & \dot{M}_p & \dot{M}_q & \dot{M}_r \\ \dot{N}_u & \dot{N}_v & \dot{N}_w & \dot{N}_p & \dot{N}_q & \dot{N}_r \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

식 (2-16)은 SNAME 표기법에 의해 표현된 것이다. x 방향의 가속도 $\dot{u}$ 에 기인하는 y 축에 대한 부가 관성력을

$$Y = -Y_u \dot{u} \quad (2-20)$$

로 표현한다. 여기서, 유체력 미계수 Y_u 는 다음과 같다.

$$Y_u : = \frac{\partial Y}{\partial u} \quad (2-21)$$

유체 동역학적 코리올리스와 구심력 행렬은

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

이 되고 여기서

$$\begin{aligned} a_1 &= X_u \dot{u} + X_v \dot{v} + X_\omega \dot{\omega} + X_p \dot{p} + X_q \dot{q} + X_r \dot{r} \\ a_2 &= X_v \dot{u} + Y_v \dot{v} + Y_\omega \dot{\omega} + Y_p \dot{p} + Y_q \dot{q} + Y_r \dot{r} \\ a_3 &= X_\omega \dot{u} + Z_\omega \dot{v} + Z_\omega \dot{\omega} + Z_p \dot{p} + Z_q \dot{q} + Z_r \dot{r} \\ b_1 &= X_p \dot{u} + Y_p \dot{v} + Z_p \dot{\omega} + K_p \dot{p} + K_q \dot{q} + K_r \dot{r} \\ b_2 &= X_q \dot{u} + Y_q \dot{v} + Z_q \dot{\omega} + K_q \dot{p} + M_q \dot{q} + M_r \dot{r} \\ b_3 &= X_r \dot{u} + Y_r \dot{v} + Z_r \dot{\omega} + K_r \dot{p} + M_r \dot{q} + N_r \dot{r} \end{aligned} \quad (2-23)$$

이다. 선박의 대칭성을 이용하면 유체동역학적 관성행렬과 코리올리스 및 구심력 행렬을 간략화 할 수 있다.

- 1) 선박의 속도가 느리고 세 평면이 대칭인 경우에는 비대각 요소는 무시할 수 있다.

유체동역학적 관성 행렬과 코리올리스 및 구심력 행렬은

$$M_A = -diag[X_u, Y_v, Z_\omega, K_p, M_q, N_r], \quad (2-24)$$

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_\omega \omega & Y_v v \\ 0 & 0 & 0 & Z_\omega \omega & 0 & -X_u u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_v v & X_u u & 0 \\ 0 & -Z_\omega \omega & Y_v v & 0 & -N_r r & M_q q \\ Z_\omega \omega & 0 & -X_u u & N_r r & 0 & -K_p p \\ -Y_v v & X_u u & 0 & -M_q q & K_p p & 0 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

이 된다.

2) 선박의 xz 평면이 대칭인 경우

$$M_A = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & -X_\omega & 0 & -X_q & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 & -Y_p & 0 & -Y_r \\ -X_\omega & 0 & -Z_\omega & 0 & -Z_q & 0 \\ 0 & -Y_p & 0 & -K_p & 0 & -K_r \\ -X_q & 0 & -Z_q & 0 & -M_q & 0 \\ 0 & -Y_r & 0 & -K_r & 0 & -N_r \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

이 되고, 여기서,

$$\begin{aligned}
a_1 &= X_u \dot{u} + X_\omega \dot{\omega} + X_q \dot{q} \\
a_2 &= Y_v \dot{v} + Y_p \dot{p} + Y_r \dot{r} \\
a_3 &= X_u \dot{u} + Z_\omega \dot{\omega} + Z_q \dot{q} \\
b_1 &= X_v \dot{v} + K_p \dot{p} + K_r \dot{r} \\
b_2 &= X_q \dot{u} + Z_q \dot{\omega} + M_q \dot{q} \\
b_3 &= Y_v \dot{v} + K_r \dot{p} + N_r \dot{r}
\end{aligned} \tag{2-28}$$

이다.

2.4.2 유체동역학적 감쇠

유체동역학적 감쇠는 포텐셜, 표면 마찰, 파도 표류, 와류에 의한 감쇠 등이 있다.

$$D(\nu) = D_P(\nu) + D_S(\nu) + D_W(\nu) + D_M(\nu) \tag{2-29}$$

$D_P(\nu)$ 는 포텐셜 감쇠, $D_S(\nu)$ 는 표면 마찰에 의한 감쇠, $D_W(\nu)$ 는 파도 표류에 의한 감쇠, $D_M(\nu)$ 는 와류에 의한 감쇠이다.

포텐셜 감쇠의 경우, 점성 감쇠와 같은 요소에 비해 미소량이기 때문에 무시할 수 있다. 하지만, 표면 마찰은 선형 표면 마찰에서 중요한 요소이며, 제어시스템 설계를 할 경우 그 영향을 반드시 고려해 주어야 한다. 비선형 표면 마찰은 거친 경계층의 고주파 운동에서 발생한다. 또한, 파도 표류에 의한 감쇠는 파랑 중에 항해하는 수상선박에 대한 부가저항으로 볼 수 있다. 파도 표류에 의한 감쇠의 경우, 유효 파고의 제곱에 비례하고 높은 해상상태에서 전진방향 속도에 가장 영향이 큰 감쇠이다. 횡방향과 회두각 방향의 경우, 파도 표류에 의한 감쇠에 비해 와류에 의한 감쇠가 크

게 작용한다. 식 (2-27)는 와류에 의한 점성 감쇠를 나타낸 것이다.

$$f(U) = -\frac{1}{2}\rho C_D(R_n)A|U|U \quad (2-30)$$

U 는 선체의 속도, A 는 수면 아래의 투사 영역, $C_D(R_n)$ 은 저항력계수, ρ 는 해수 밀도, R_n 은 레이놀드 수이다. 선형 감쇠와 비선형 감쇠는 분리가 어렵기 때문에 전체 유체동역학적 감쇠를 식 (2-28)에서 나타낸 것과 같이 선형 감쇠와 비선형 감쇠의 합이다.

$$D(\nu) = D + D_n(\nu) \quad (2-31)$$

여기서, D 는 선형 감쇠 행렬이고, $D_n(\nu)$ 는 비선형 감쇠 행렬이다.

1) DP 선박에 대한 감쇠 모델

선박의 속도가 느리고 xz 평면 대칭인 DP 선박의 경우, 전진속도 방정식과 조종 운동 방정식을 분리할 수 있다. heave, roll, pitch를 무시하면 식 (2-57)와 같은 선형 감쇠력 및 모멘트 행렬로 표시할 수 있다.

$$D = -\begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

선박의 속도가 느린 경우, $N_v = Y_r$ 로 가정할 수 있다.

실선의 경우, 비선형 감쇠와 감쇠행렬에 대해 비대각 요소들을 결정하는

것이 어렵다. 그렇기 때문에 제어시스템의 목적에 따라 감쇠행렬의 종류를 결정한다.

2.4.3 복원력과 모멘트

선박은 중력과 부력의 영향을 받고, 중력과 부력을 복원력이라 부른다. 복원력은 선박의 크기와 형태, 높이, 무게중심과 부력중심의 위치에 따라 결정된다.

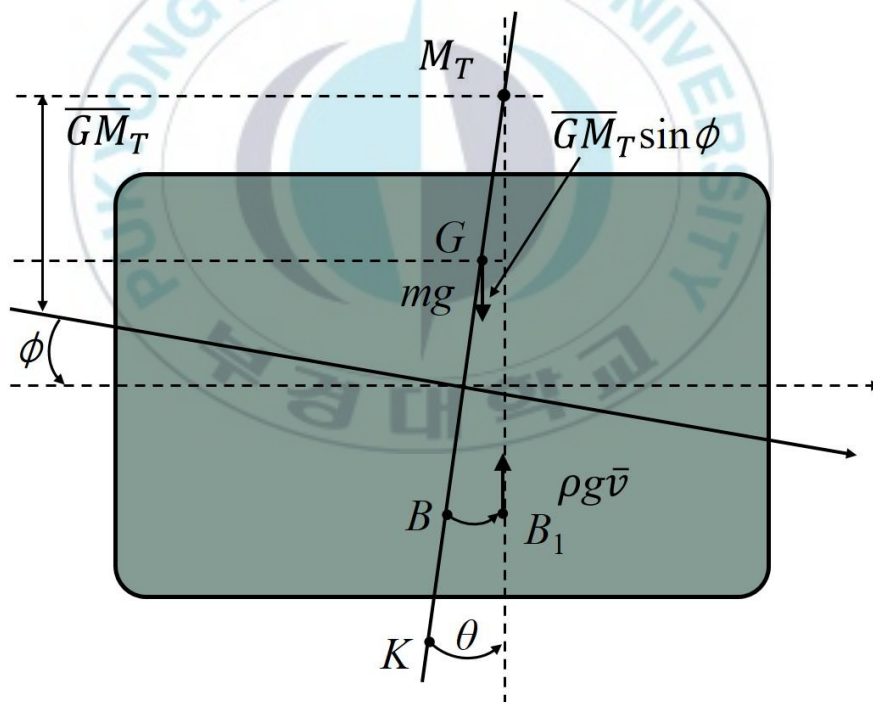


Fig. 2-2 Gravity and Buoyancy Forces on the yz-Plane intersection

메타센터는 부심의 수직 연장선 또는 물속에서 선체가 위치하는 경우나 경사가 졌을 경우, 새로 만들어지는 새로운 부심의 다른 연장선과의 교점이다. 복원력과 모멘트 행렬은

$$g(n) = \begin{bmatrix} -\rho g \int_0^z A_{wp}(\zeta) d\zeta \sin\theta \\ pg \int_0^z A_{wp}(\zeta) d\zeta \cos\theta \sin\Phi \\ pg \int_0^z A_{wp}(\zeta) d\zeta \cos\theta \cos\Phi \\ pg \nabla \frac{GM_T \sin\Phi \cos\theta \cos\Phi}{GM_L \sin\theta \cos\theta \cos\Phi} \\ pg \nabla \frac{GM_L \sin\theta \cos\theta \cos\Phi}{(-GM_L - GM_T) \sin\Phi \sin\theta} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

이 된다. 여기서 $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ 는 위치와 오일러 각, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도이다. $A_{wp}(\zeta)$ 는 연직 방향 위치로 표현되는 선박의 수평면적, ∇ 는 배수량이다.

2.5 3차원 비선형 선박모델

해수면을 운항하는 선박은 xz 평면이 대칭이며, 조종 운동 방정식과 전진 속도 방정식을 따로 분리할 수 있다. 복원력 항은 선박의 메타센터 높이와 부심과 무게중심의 위치에 따라 정해지기 때문에 조종운동에 영향력을 미치지 않는다. 다음을 4가지 가정이면, 3차원 비선형 선박모델을 유도할 수 있다.

1) 선박의 조종운동과 전진방향 속도가 분리 가능한 경우

2) 선박의 heave, roll 및 pitch를 무시할 수 있는 경우

$$(\omega = p = q = \dot{\omega} = \dot{p} = \dot{q} = 0)$$

3) 선체 고정좌표계 원점이 선체 중심선에 위치한 경우($y_G = 0$)

4) 선박의 좌우가 대칭인 경우 ($I_{xy} = I_{yz} = 0$)

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D\nu = \tau \quad (2-34)$$

여기서, $\nu = [v \ r]$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & mx_G - Y_r \\ 0 & mx_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -C_{13} \\ 0 & 0 & C_{23} \\ C_{13} & -C_{23} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{13} = (m - Y_v)v + (mx_G - \frac{Y_r + N_v}{2})r$$

$$C_{23} = (m - X_u)u,$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -N_v - N_r \end{bmatrix}$$

이다.

제 3 장 선박운동제어계 설계

3.1 서론

본 연구에서 선박운동특성분석과 시스템 모델링을 위해서 Fig. 3-1에 제어대상으로 하고 있는 선박의 파일럿 모델을 나타내고 있다. 그림에 나타난 것과 같이 선박 선수 및 선미 측에 바우(bow), 스텐(stern) 스러스터를 각각 장착하였다. 그리고 선미측에는 주추진장치로 회전형 추진장치를 장착하고 있으며, 선박의 제원은 Table 3-1에 요약하여 나타내었다. 가장 기본적인 정보로는, 선체질량, 선체의 길이 및 각 액추에이터가 설치된 위치 정도이다.

모델링 경로추종과정에서 추종오차를 최소화하기 위해 PID 제어기법과 최적제어이론에 기반을 둔 제어계를 설계하고 적용하여 그 결과를 비교 평가한다. 이를 기반으로 시뮬레이션을 수행하고, 경로추종성능 등 자율운항 선박이 갖추어야 할 운동제어성능을 평가하도록 한다.

3.2 제어대상 모델링

본 논문에서 고려하는 선박은 무게 및 회전중심도 좌표중심 근처에 있고, XY 평면에서 서로 대칭이라고 가정한다. 그러면 선박운동방정식은 다음과 같은 일반적인 선형모델로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{M}\nu + D\nu &= \tau, \\ \dot{\eta} &= R(\psi)\nu \end{aligned} \quad (3-1)$$

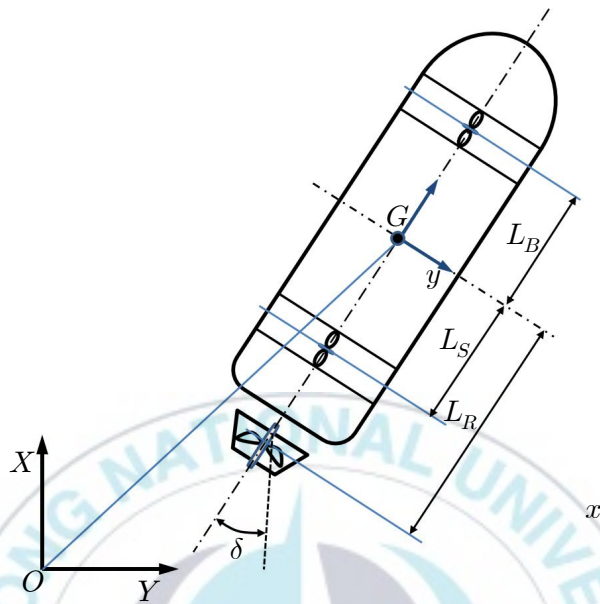


Fig. 3-1 System description of the controlled ship

Table 3-1 Specification of the vessel for experiment

Parameter	Value
Length overall	1.10[m]
Breadth	0.15 [m]
Draft	0.05 [m]
Number of Propeller	1 set
Numbers of side thruster	2 sets
L_B	0.48[m]
L_S	0.40[m]
L_R	0.34[m]

여기서 $M \in R^{3 \times 3}$ 은 관성행렬이고, $D \in R^{3 \times 3}$ 는 댐핑행렬로 각각 식 (3-2)와 같이 표현된다.

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}, \quad (3-2)$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -N_v - N_r \end{bmatrix}$$

그리고, Y_r, N_v, Y_r, N_v 는, 선속, 방향전환속도가 느린 경우에는 일반적으로 무시한다. 이럴 경우 식 (3-2)의 행렬은 대각행렬로 간단하게 표현된다.

그리고 $\eta = [x, y, \psi]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표(earth fixed frame)에서의 관성 위치 및 각도를 표현하는 변수이다. 또한 $\nu = [u, v, r]^T \in R^3$ 는 선체고정좌표(Body Fixed Frame)에서의 서지(surge), 스웨이(sway) 및 요우(yaw)방향 속도를 나타낸다. 그리고 $R(\psi)$ 는 선박좌표를 관성좌표로 변환시키는 변환행렬로 다음 식과 같다.

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

선박에 작용하는 서지, 스웨이, 요우방향의 외력 및 모멘트 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in R^3$ 는 두 개의 스러스터 및 주추진장치에 의해 발생되며, 각 요소 벡터는 다음 식으로 정리된다.

$$\tau_1 = T_p + T + \Delta u, \quad (3-4)$$

$$\tau_2 = T_B + T_S + N + \Delta v,$$

$$\tau_3 = T_B L_B - T_S L_S + N L_R + \Delta r$$

3.3 파라미터 동정

모형 선박에 대한 물리특성은 실험을 통해 분석하여 수식모델을 구축하고 모델에 표현된 파라미터를 추정한다. 실험용 선박에서 동정해야 할 물리파라미터는 식 (3-1)~(3-4)에 표현된 대부분이 해당된다. 동정을 위해서는, 선박의 스웨이 모션 및 서지방향 운동 특성을 분석하고 스러스터 및 주추진장치 구동입력 및 출력간의 관계를 분석하도록 한다.

먼저 요우운동특성을 분석(동정)하기 위해 바우 및 스텐 스러스터에 펄스형의 구동전압을 인가했을 때의 응답을 Fig. 3-2 (bow thruster)와 Fig. 3-3 (stern thruster)에 나타내었다. 이 그림에서 실선은 실험결과이고, 파선은 파라미터 동정을 통해 구한 값을 검증하기 위한 시뮬레이션결과를 나타내고 있다.

그리고 식 (3-4)에서 스러스터 및 주추진장치의 추력특성(T_B , T_S , T_p)은 모터 인가전압과 추진력의 관계로부터 구하도록 한다. 그래서 각 추진장치에 다양한 전압을 인가하고 그때의 발생추력을 실험으로 구하였고, 그 중 대표적인 특성을 Fig. 3-5 ~ Fig. 3-7에 나타내었다. Fig. 3-5는 바우측 스러스터, Fig. 3-6은 스텐측 스러스터, Fig. 3-7은 주추진장치로부터 발생된 추력을 각각 나타내고 있다. 이때 실선은 실험결과이며 파선은 추정값을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

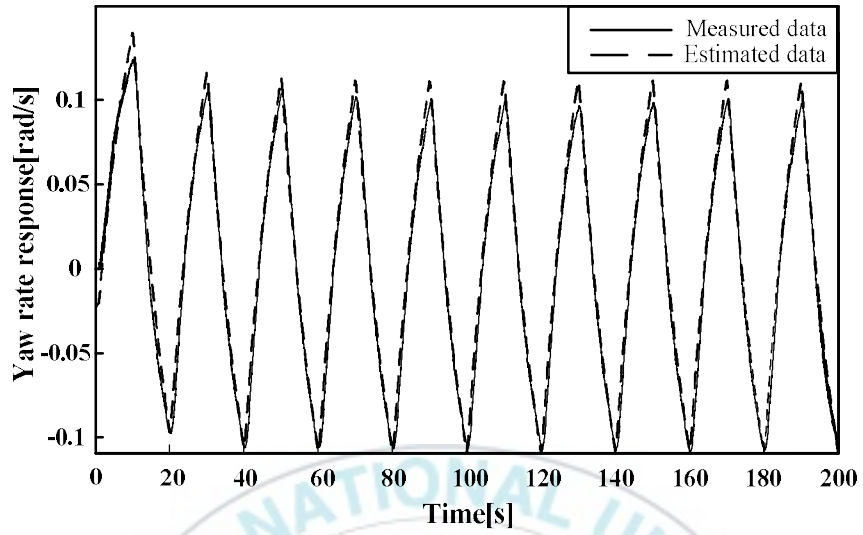


Fig. 3-2. Yaw rate responses by using bow thruster (solid: experiment, dashed: estimation).

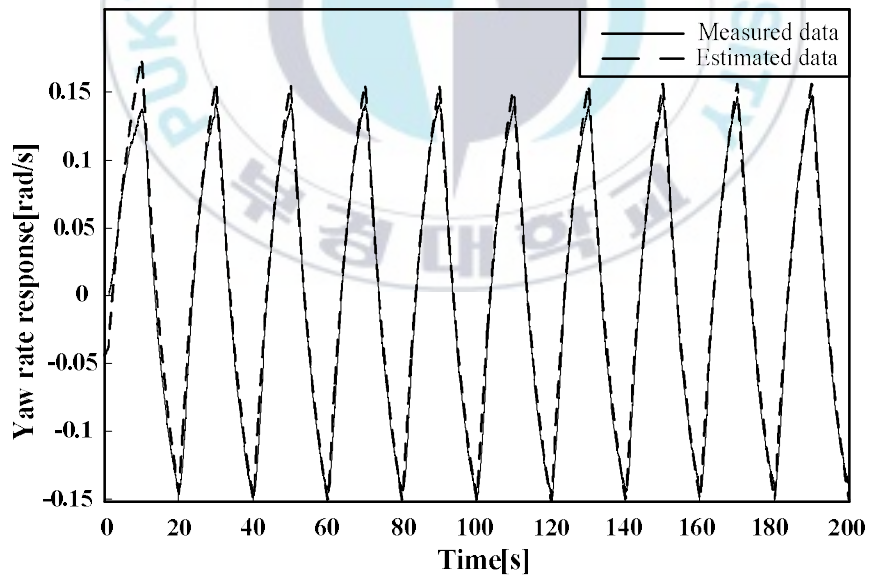


Fig. 3-3 Yaw rate responses by using stern thruster (solid: experiment, dashed: estimation).

이때 동정결과로부터 구한 입력전압과 추력과의 관계는 2차함수형식으로 표현된다. 그러나 본 연구에서는 편이상 단순화하여 다음식과 같이 선형적 관계로 정의한다. 여기서 V_B , V_S , V_P 는 각각 바우, 스턴 및 주추진장치 구동전압을 나타낸다.

$$T_B = 0.18 V_B, \quad (3-5)$$

$$T_S = 0.26 V_S,$$

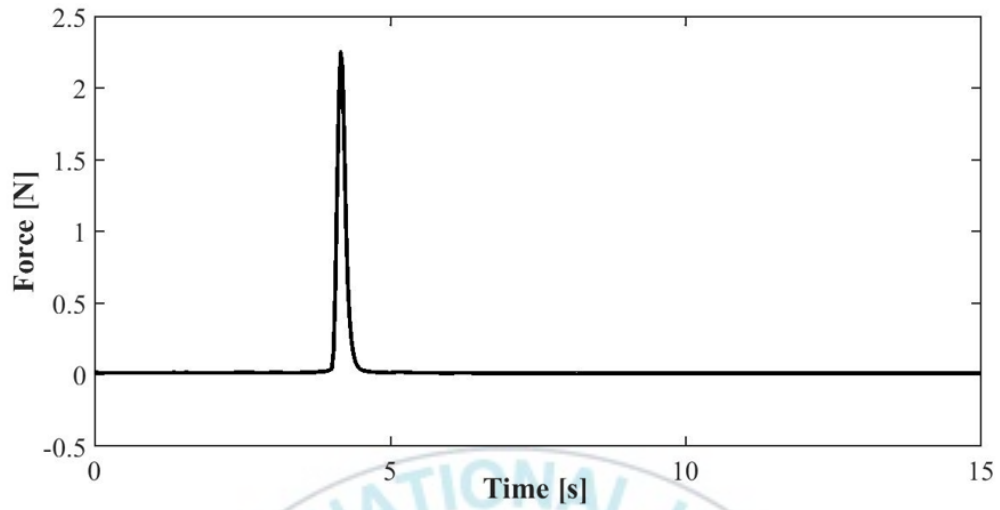
$$T_P = 0.21 V_P$$

그리고 주추진장치는 아지무스 추진장치이므로, 선회를 위한 러더(rudder) 기능을 포함하고 있다. 본 연구에서는 별도의 러더가 없고 주추진장치의 회전각도를 조절함으로써 선수각을 조절한다. 따라서 주추진장치의 회전각도에 따라 추력이 변하게 되므로 이러한 영향도 수식모델에 반영해야 하는데, 이것은 식 (3-4)에서 직압력 T 와 평행력 N 으로 정의되고 다음 식으로 표현된다.

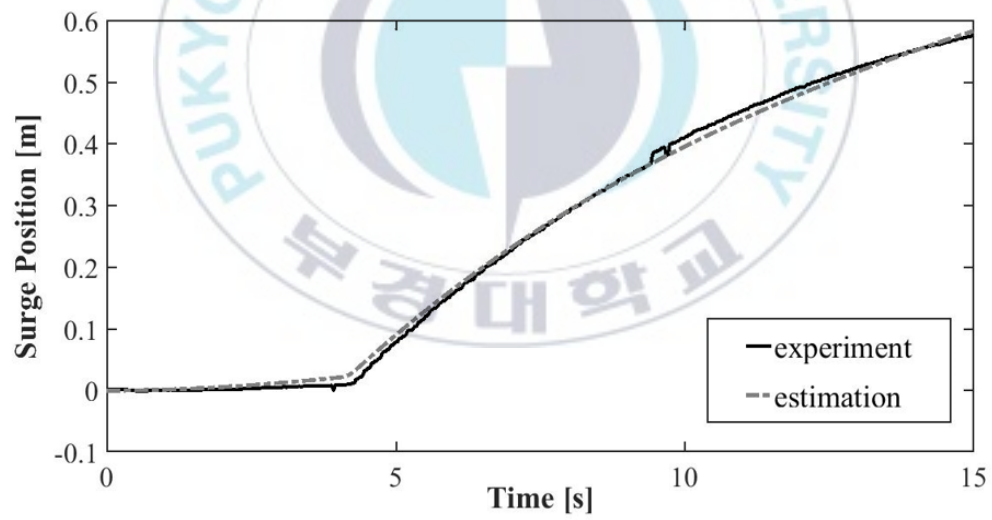
$$T = K_v \frac{\delta}{\delta_{\max}} \cdot \max(T_P, \delta = 0), \quad (3-6)$$

$$N = K_u \frac{\delta}{\delta_{\max}} \cdot \max(T_P, \delta = 0)$$

여기서, k_v , k_u 는 추정해야 할 상수값이며, $\max(T_P, \delta = 0)$ 는 주추진장치의 최대추력이다. k_v , k_u 값을 추정하기 위해 최대출력상태로 해 두고, 추진장치의 회전각도를 0[deg]에서 30[deg]까지 변경해가면서 서지 및 스웨이방향 추진력분포를 계측하였다.



(a) force for vessel moving



(b) vessel motion made by pulling force (solid: experiment, dashed: estimation)

Fig. 3-4 Pulling force for moving the vessel in surge direction and vessel motion

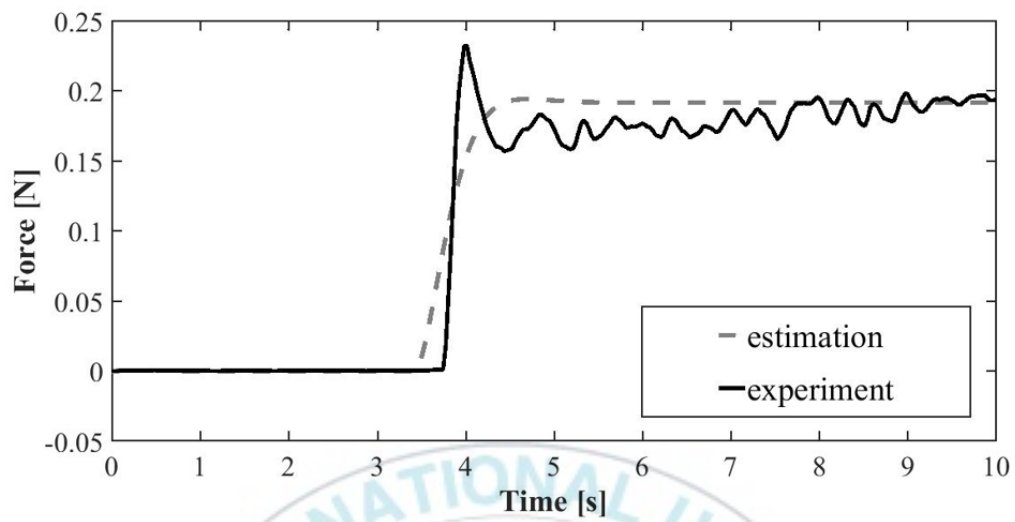


Fig. 3-5. Propulsion force of bow thruster (solid: experiment, dashed: estimation)

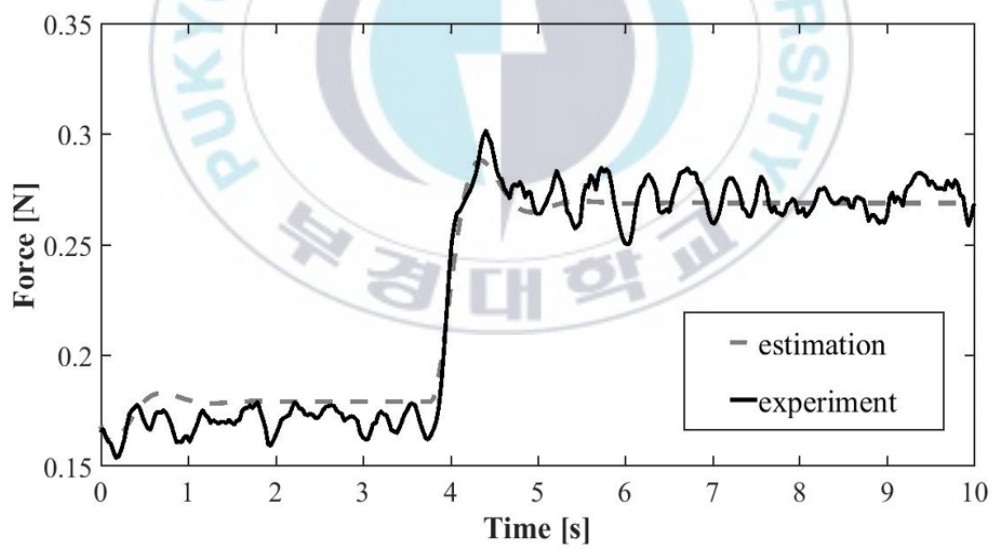


Fig. 3-6. Propulsion force of stern thruster (solid: experiment, dashed: estimation)

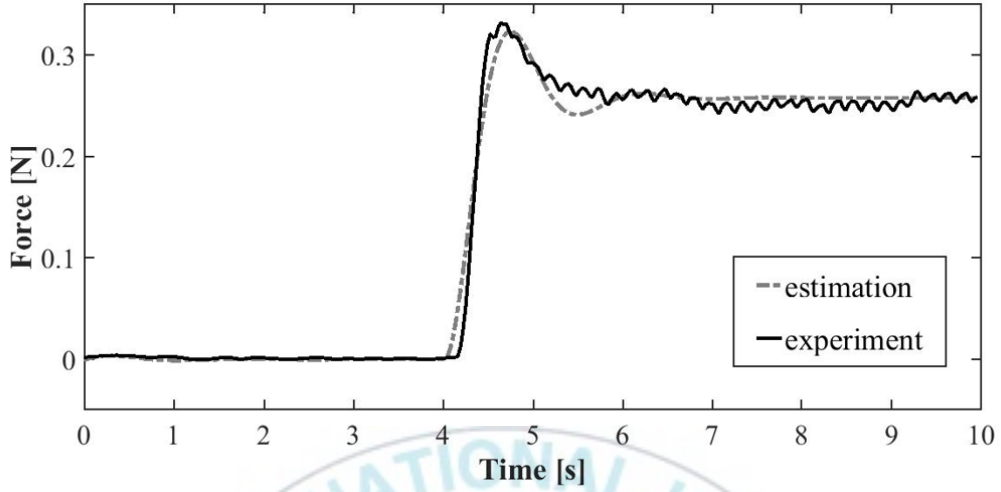


Fig. 3-7. Propulsion force of azimuth propeller (solid: experiment, dashed: estimation)

결국 실험을 통해서 $0.73 \leq k_v \leq 2.78$, $0.65 \leq k_u \leq 1.61$ 의 범위의 값으로 계측되었다. 이것의 평균값 $k_v = 1.61$, $k_u = 0.78$ 을 제어기 설계 및 시뮬레이션에 이용하기로 한다.

결과적으로 실험 및 시뮬레이션으로 계산하고 추정한 식 (3-2)의 물리파라미터 행렬은 다음과 같이 정리 된다.

$$M = \begin{bmatrix} 0.22 & 0 & 0 \\ 0 & 10.03 & 0 \\ 0 & 0 & 1.19 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 2.70 & 0 \\ 0 & 0 & 0.08 \end{bmatrix}$$

3.4 PID 제어기법에 의한 선박운동제어 시뮬레이션

지금까지의 준비를 기초로 하여 PID 제어기법에 의한 선박운동제어 시뮬레이션을 실행한다. Fig. 3-8과 같이 선박운동제어를 하기 위해서 가장 일반적인 제어기를 이용해서 최적 이득 조정기법을 이용하여 설계하였으며 PID 제어기의 각 이득은 식 (3-8)과 같다.

$$K_p = \begin{bmatrix} 12.9 & 0 & 0 \\ 0 & 16.9 & 0.05 \\ 0 & 0.05 & 3.38 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 2.06 & 0 & 0 \\ 0 & 2.70 & 0.09 \\ 0 & 0.09 & 0.53 \end{bmatrix}$$

$$K_d = \begin{bmatrix} 4.13 & 0 & 0 \\ 0 & 6.08 & 0.18 \\ 0 & 0.18 & 1.21 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션에서 선박이 이동해야 할 경로를 Fig. 3-8과 같이 두 단계로 설정하였다. 이것은 선박이 항만으로 진입하여 접안이 완성되기까지의 일반적인 상황과 과정 설정하고 선박운동을 적절히 제어하여 정해진 위치에 정지하도록 하는 것에 목표를 둔다. 시뮬레이션 방법은, Fig. 3-8과 같이 A 지점에서 출발하여, B점을 통과한 후 최종적으로 C점에서 선박이 정지하도록 경로를 설정하였다.

이때 최종목표지점 좌표는 $(x, y) = (15[m], 10[m])$ 이고, 선수각(요우각도)은 시작점에서 30° 이며, 최종적으로는 접안 안벽과 선박이 평행하도록 0° 로 설정하였다. 이렇게 설정한 값들을 기반으로 시뮬레이션을 실행하였다. 미리 설정된 이동경로에 대한 해당선박의 추종성능을 Fig. 3-9에 나타내었

다. 그리고 선박이 설정된 경로를 추종하는 과정에서의 선수각 변화를 나타내었다. 설정된 선수각을 양호하게 추종하고 있을 뿐 아니라, 설정된 경로에 대한 선박의 추종성능도 상당히 우수함을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 3-10에는, 선박운동을 제어하기 위해 제어기로부터 각 액추에이터(바우, 스텐 스러스터 및 주추진장치)에 인가되는 제어전압을 나타내고 있다. Fig. 3-11은 선수각을 제어하기 위한 주추진장치의 회전각도를 나타내고 있다. 여기서 주추진장치의 최대 회전각도는 30° 로 제한하였다. 여기서 주목해야 할 것은 Fig. 3-10에 나타낸 각 액추에이터 구동전압이다. 접안하는 선박이 안벽에 접근한 상태(Fig. 3-8에서 B-C구간)에서 사이드 스러스터가 동작하고 있음을 알 수 있다. B-C구간에서는 주추진장치의 회전각(러더각)이 0° 이다. 따라서 선수각은 사이드 스러스터를 구동하여 조절해야 하며, 결국 스러스터 추진력으로 안벽과 평행을 유지하려 노력하고 있다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 각 액추에이터 제어를 통해 선박운동을 제어하기 위한 제어력이 발생되고, 임의의 지점에서부터 접안지점까지 선박을 안전하고 정확하게 이동시킬 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

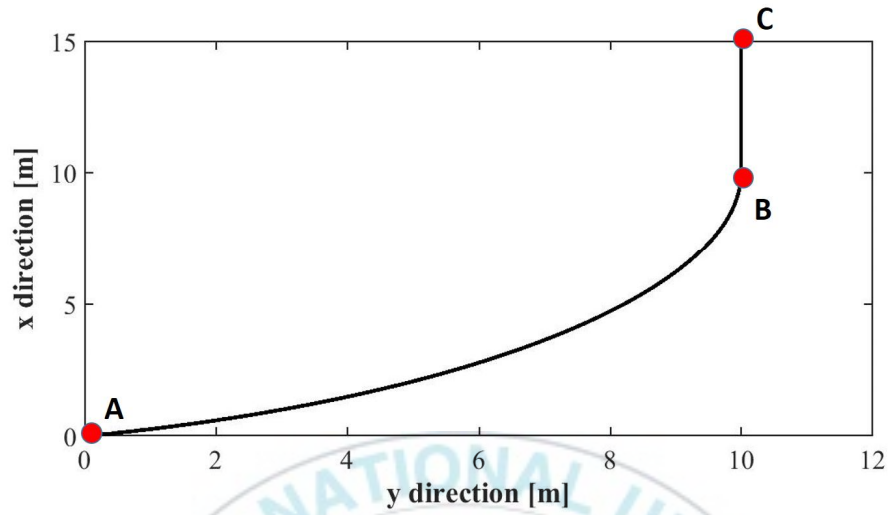


Fig. 3-8 Reference tracking route for controlled vessel

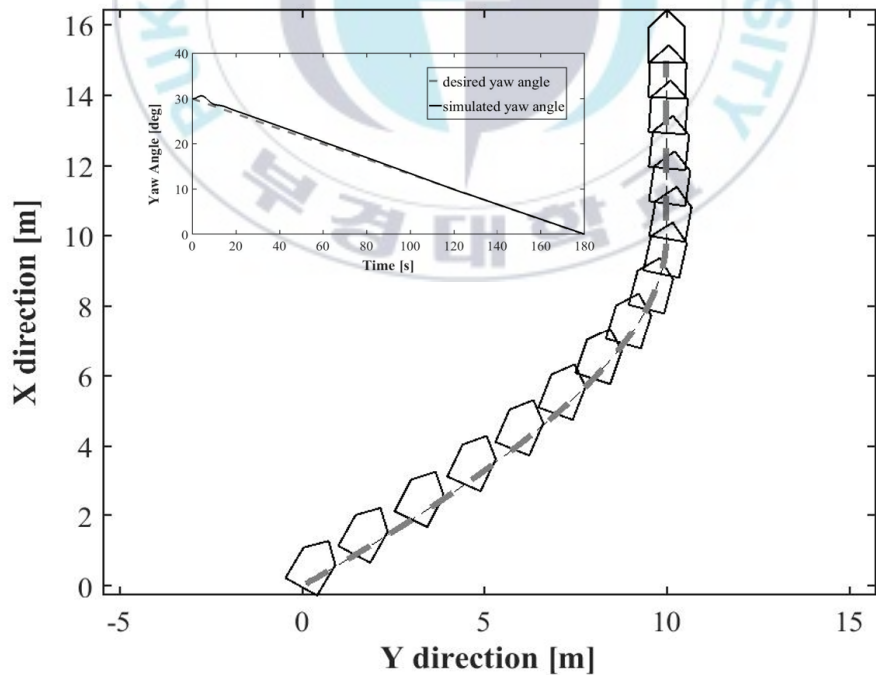


Fig. 3-9 Tracking performance of the vessel for the reference tracking route

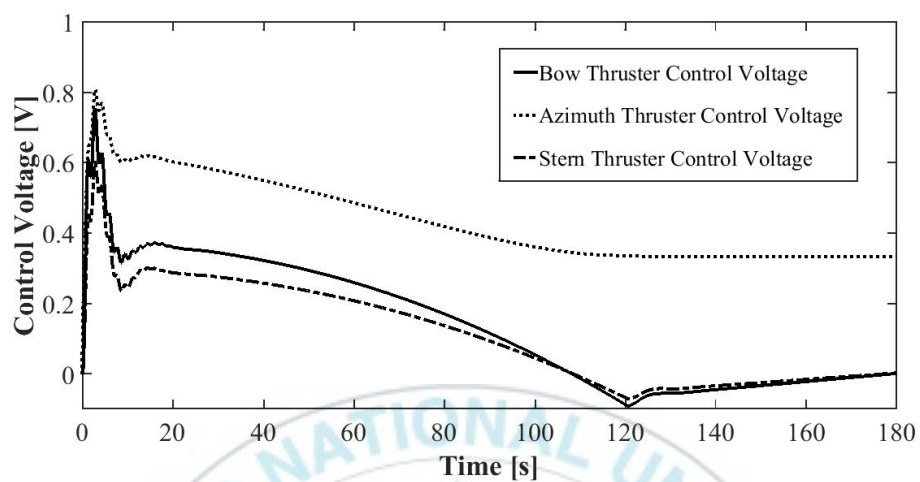


Fig. 3-10 Electric control power inputs[V] to the three actuators (main propeller, bow and stern thrusters) during vessel route tracking

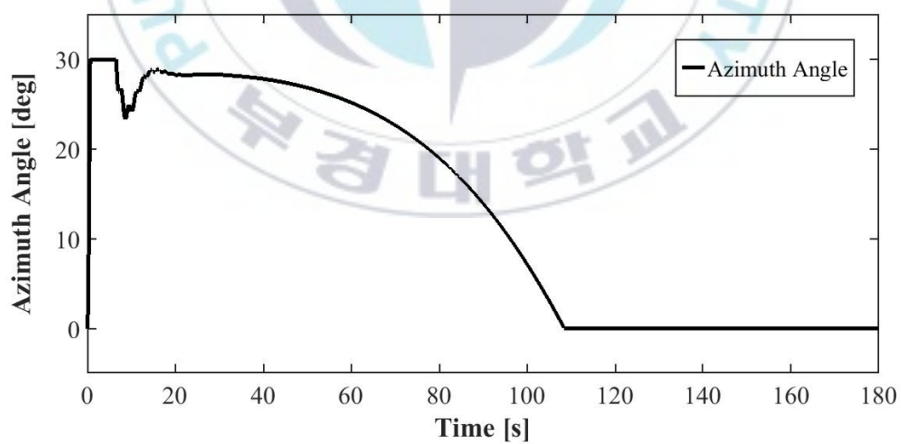


Fig. 3-11 Main propeller(azimuth) rotation angle during vessel route tracking

3.5 최적제어이론에 의한 선박운동제어 시뮬레이션

제어대상 선박이 설정된 경로를 잘 추종하면서, 최종 목표위치에 오차없이 도달하도록 하는데 제어기 설계 목표를 두고 있다. 이를 위해서는 추종오차를 최소로 할 수 있는 서보계(servo-system) 설계가 필요하다. 따라서 식 (3-6), (3-7)에 포함된 불확실한 파라미터를 공칭값(nominal value)과 불확실성의 크기로 다음과 같이 정의한다.

$$M_{11} = M_0 \pm \Delta_m \quad (3-9)$$

$$D_{11} = D_0 \pm \Delta_d$$

$$k_v = k_{v0} \pm \Delta_v \quad (3-10)$$

$$k_u = k_{u0} \pm \Delta_u$$

여기서 M_0, D_0, k_{v0}, k_{u0} 는 각각의 공칭값(nominal value), $\Delta_m, \Delta_d, \Delta_v, \Delta_u$ 는 파라미터 변동을 크기로 나타낸 것이다. 이때 공칭값을 변동의 평균값으로 선정하면, 식 (3-9) 및 (3-10)은 다음과 같이 정리된다.

$$M_{11} = 0.20 \pm 0.02 \quad (3-11)$$

$$D_{11} = 0.08 \pm 0.09$$

$$k_v = 1.76 \pm 1.03 \quad (3-12)$$

$$k_u = 1.13 \pm 0.48$$

식(3-11) 및 식 (3-12)의 표현은 로버스트 제어기 설계법에 기반한 제어기 설계시에 이용된다. 그리고 본 연구에서 제어변수는 서지, 스웨이 및 요우각도로 3개를 설정하였다. 그런데 제어대상 선박에 장착한 액추에이터는, 두기의 사이드 스러스터, 주추진장치와 러더에 해당되는 주추진장치 회전각도 조절

장치로 4개이다. 즉, 제어변수보다 액추에이터 수가 많다. 이러한 경우는 DP(Dynamic Positioning) 시스템에서 흔히 찾아볼 수 있는 일반적인 시스템 구성으로 제어력분배(control allocation)를 통해 대응이 가능하다.

따라서 본 연구에서도 Fig. 3-12와 같이, 제어기에서 계산된 제어신호(τ_c)를 제어력분배를 통해 액추에이터에 전달하는 방법을 도입한다. 그림에서 $f_i (i=1, \dots, 4)$, δ_c 는 사이드 스러스터 및 주추진장치 회전각도를 제어하기 위한 제어입력을 나타낸다. 그리고, τ_a 는 액추에이터를 통해 발생하는 실제 선박운동(x, y, ψ)을 제어하기 위한 제어입력이다. 이어서 본 연구에서의 목표인 추종오차를 최소로 하는 서보계 설계 문제에 대해 간단히 설명하도록 한다. 최종적으로 구성되는 서보계는 Fig. 3-13과 같고, 계단상 입력이나 외란으로 인해 발생하는 추종오차를 없애도록 적분기를 포함하고 있다.

여기서 K_w , K_f 는 적분기 이득 및 상태피드백 이득이며, 최적제어이론에 따라 최적의 제어성능을 확보할 수 있는 것으로 설계한다. 이를 위해 먼저, 외란이 존재하지 않을 경우 Fig. 3-13의 서보계는

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{w}_e &= e = r - Cx \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{3-13}$$

와 같이 표현되므로, $u = -K_{fw} = [-K_f - K_w]$ 라 두면, 식 (3-13)은 다음 식으로 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{w}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_f & BK_w \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (3-14)$$

$$y = [C \ 0] \begin{bmatrix} x \\ w_e \end{bmatrix}$$

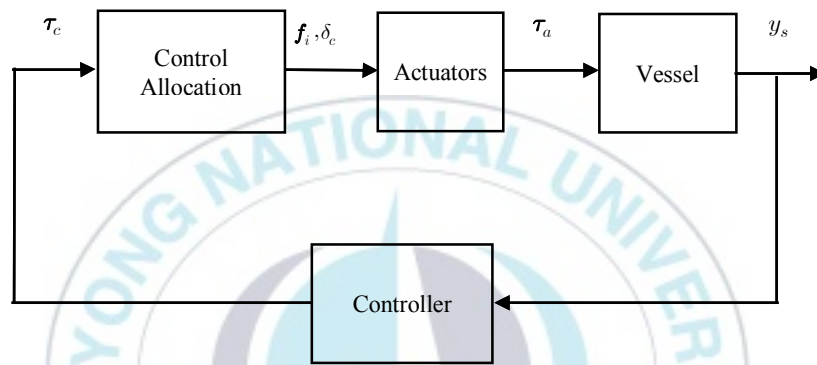


Fig. 3-12 Extended control allocation problem with actuators

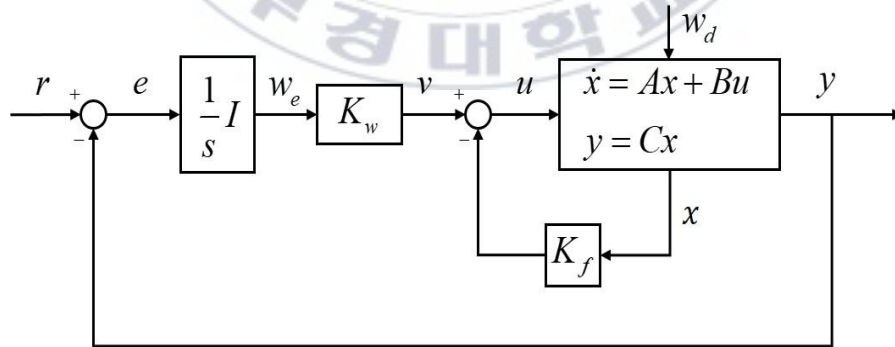


Fig. 3-13 A servo-system with an integrator to reject step type input signals

Fig. 3-13에 나타낸 제어계의 설계목표는 정상상태에서 오차 $e = r - Cx$ 가 '0'이 되도록 하는 이득 K_f, K_w 를 결정하는 문제이다.

단, 식 (3-11) 및 식 (3-12)에 정의한 파라미터 변동을 고려하여 강인성(robustness)을 확보하도록 제어기를 설계한다. 이럴 경우, 식 (3-14)의 서보계에서 식 (3-9)~(3-12)와 같은 파라미터 변동이 영향을 미치는 행렬을

$$A_s(\Delta) = \begin{bmatrix} A - B(\Delta)K_f & B(\Delta)K_w \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

(where, $\Delta \ni \{\Delta_m, \Delta_d, \Delta_v, \Delta_u\}$)

와 같이 표현하면, 이것은 다시 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_s(\Delta) = \sum_{j=1}^k k_j A_{sj}, \quad (3-16)$$

$$\sum_{j=1}^k k_j = 1, \quad k_j \geq 0.$$

본 연구에서는 LQ 제어이론에 따라 이득을 구하였다. 이때 식 (3-16)의 표현으로부터, 하나의 리카티(Riccati) 방정식으로 제어기 이득을 구하지 않는다. 즉 모든 파라미터 변동범위에서 시스템의 안정성이 확보되어야 하므로 다음의 부등식

$$PA_{sj} + A_{sj}^T P < 0, \quad (j=1, \dots, 4) \quad (3-17)$$

를 만족하는 $P = P^T > 0$ 를 구하면 된다.

이것은 LQ제어이론에 기초를 두고, 리카티 방정식을 부등식으로 변형하여 표현하면 LMI(linear matrix inequality)기법으로 강인성과 제어성능을 동시

에 만족하는 제어기 이득을 구할 수 있다.

결국 MatLab LMI 툴을 이용하여 상태피드백이득과 적분기 이득을 각각 다음 식과 같이 구하였다.

$$K_f = \begin{bmatrix} 207.02 & 0 & 0 & 29.60 & 0 & 0 \\ 0 & 47.14 & -0.01 & 0 & 50.39 & -0.01 \\ 0 & -0.01 & 132.84 & 0 & 0 & 54.42 \end{bmatrix}, \quad (3-18)$$

$$K_w = \begin{bmatrix} 12.04 & 0 & 0 \\ 0 & 2.38 & -0.01 \\ 0 & -0.01 & 4.78 \end{bmatrix}$$

식 (3-18)의 제어기 이득을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에서는 Fig. 3-14에 나타낸 것과 같이 스리스트터와 주추진장치로, 대상선박을 접안지점 부근까지 이동시킨 후, 마지막 접안지점인 안벽까지는 평행하게 이동시켜 접안작업을 완성하는 두 단계로 설정하였다. 이것은 터그보트의 지원으로 접안작업을 수행하는 현재의 작업방법과 유사하다.

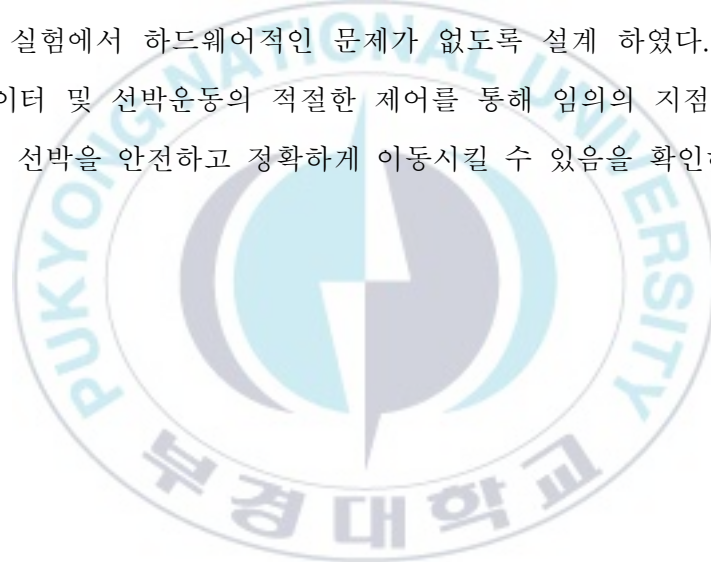
출발점에서의 선박위치는 $(x_0, y_0) = (0[m], 0[m])$, 선수각(ψ_0)은 $0[\text{deg}]$ 로 설정하였다. 이 상태에서 출발하여 선박위치가 $(x_b, y_b) = (-8[m], 10[m])$, 선수각(ψ_b)이 $180[\text{deg}]$ 가 되면 일차 접안단계인 Ballastic 과정은 종료된다.

Ballastic 종료지점에서, 다시 평행으로 이동하여 최종 접안위치 $(x_{final}, y_{final}, \psi_{final}) = (-8[m], 10[m], 180[\text{deg}])$ 에 도달하게 되면 주어진 접안작업이 완전히 종료된다.

초기상태에서 최종적으로 접안해야할 위치까지 잘 추종해 가고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 3-15와 Fig. 3-16은 선박이 Fig. 3-14와 같이 경로추종을 수행하는 과정에서의 선박 및 액추에이터의 운동특성을 보다 상세하게 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 3-15는 경로추종과정에서의 서지, 스웨이 및

요우운동특성을 각각 나타내고 있다.

그리고 Fig. 3-16은 선박의 운동을 제어하기 위해 각 액추에이터에 인가되는 구동전압을 나타내고 있다. 전술하였듯이 제어대상 선박에는 두기의 스러스터, 하나의 주추진장치와 회전각도를 조절하기 위한 구동장치로 구성되어 있다. Fig.3-16에서 (a)는 주추진장치 구동전압, (b)는 바우 스러스터 구동전압, (c)는 스텐 스러스터 구동전압, (d)는 러더 구동전압을 각각 나타내고 있다. 각 액추에이터 구동전압은 $\pm 20[V]$ 이하이다. 이것은 실험용 선박에 장착된 액추에이터의 허용전압 크기를 고려하여 제어기를 설계한 결과로, 향후 진행될 실험에서 하드웨어적인 문제가 없도록 설계 하였다. 결론적으로 각 액추에이터 및 선박운동의 적절한 제어를 통해 임의의 지점에서부터 목표지점까지 선박을 안전하고 정확하게 이동시킬 수 있음을 확인하였다.



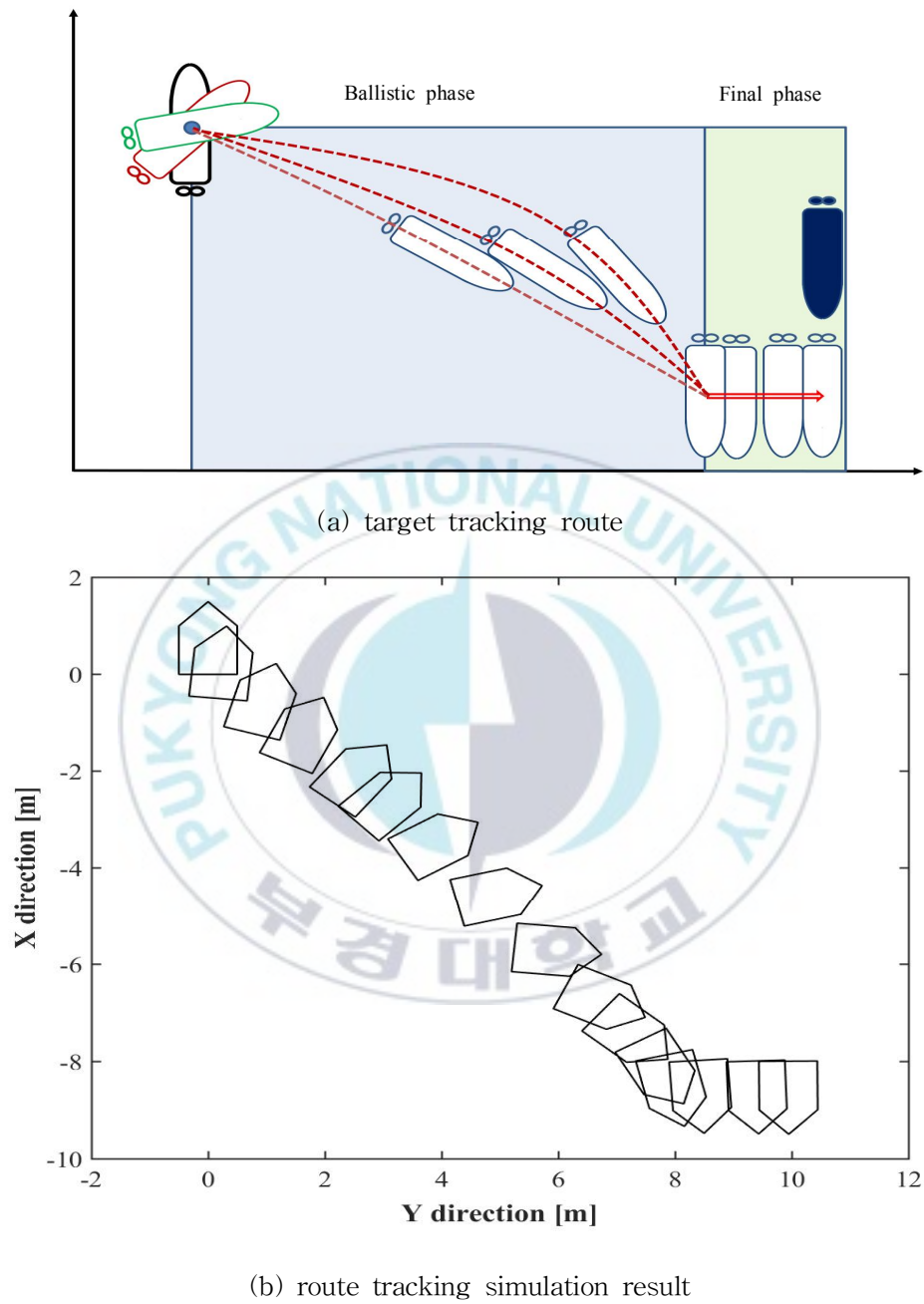
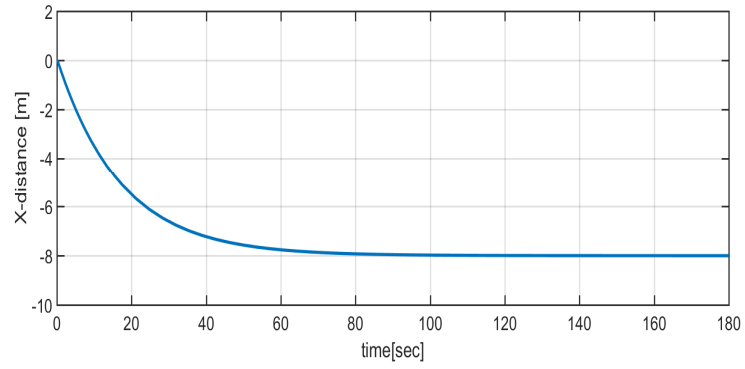
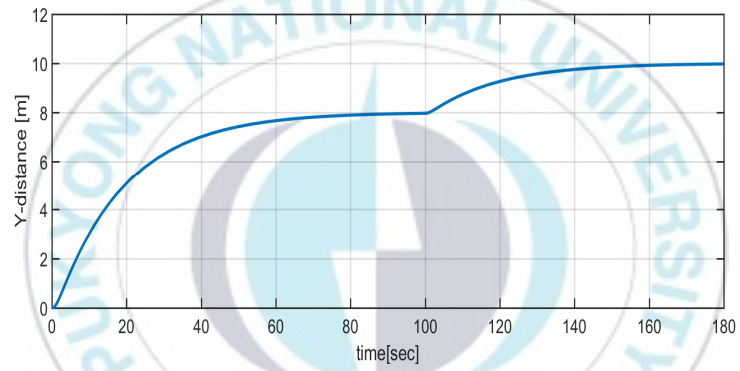


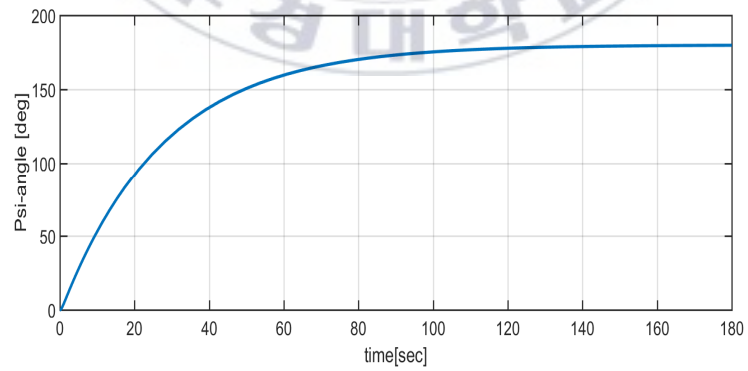
Fig. 3-14 Tracking performance of the controlled ship (start position : (0[m], 0[m], 0[deg]), final position : (-8[m], 10[m], 180[deg]))



(a) surge motion

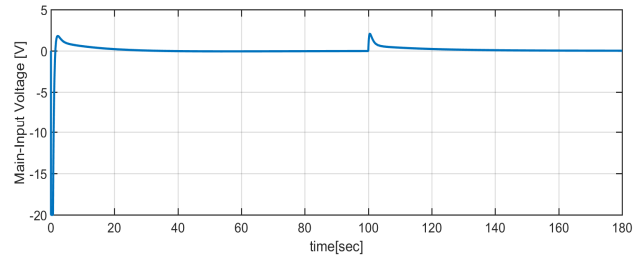


(b) sway motion

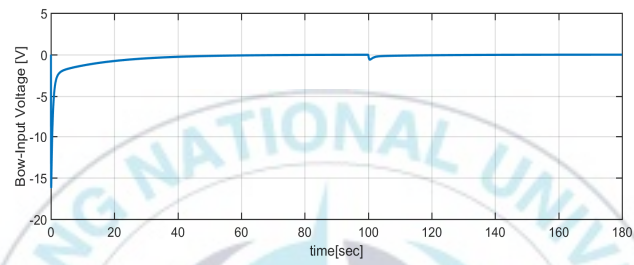


(c) yaw motion

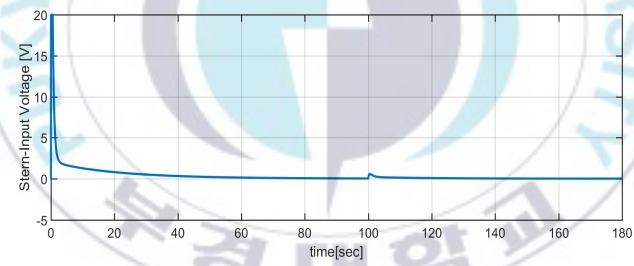
Fig. 3-15 Ship motions during tracking the given target route



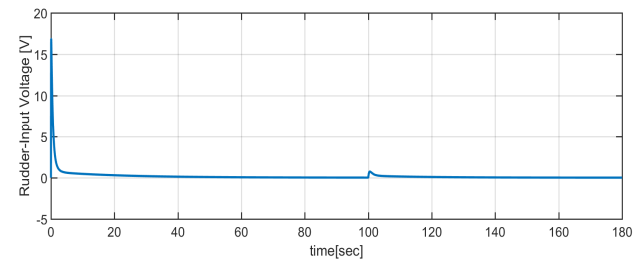
(a) control power input to the main propeller [V]



(b) control power input to the bow thruster [V]



(c) control power input to the stern thruster [V]



(d) control power input to the rudder [V]

Fig. 3-16 Control power signals for the actuators

3.6 결론

본 장에서는 선박운동특성분석과 시스템 모델링을 위한 제어기 설계 문제에 대해서 고찰하였다. 즉, 두기의 사이드 스러스터와 하나의 Azimuth 형 주추진장치를 갖춘 선박을 제어대상으로 하여 제어성능을 확보하기 위한 PID제어기 및 최적제어이론에 기반을 둔 제어기를 적용하여 자율운항선박이 갖추어야 할 운동제어성능을 평가 하였다.

PID제어기로는 임의의 지점에서부터 접안지점까지 각 액추에이터의 적절한 제어를 통해서 우수한 선박운동제어성능을 달성할 수 있었으나 외란억제성능 및 불확실성에 강인하도록 제어기를 설계할 필요성이 있음을 알 수 있었다. 최적제어이론에 기반을 둔 제어계를 이용하여 접안경로를 Ballastic 과정과 Final 과정으로 구분하여 적용한 결과 안전하고 신속하게 접안할 수 있었다. 파라미터 변동에 대한 강인 안정성과 장인추종성능을 동시에 확보하기 위한 제어전략 및 제어기법 등의 유효성을 검증하였다.

제 4 장 실험 및 평가

4.1 서론

본 장에서는 지금까지의 이론적 연구를 바탕으로 실험을 수행한다. 이미 실험대상 선박에 대해서는 충분한 정보를 확보하고 있다고 가정한다. 그러나, 선박운동 등 물리적 특성을 완벽하게 파악하는 것은 거의 불가능하므로, 다양한 방법으로 제어계를 설계하고 가능한 바람직한 제어성능을 확보하기 위한 노력은 필요하게 된다. 본 연구에서도 이와 같이 실험수행상의 어려움을 가능한 방법을 활용하여 해결하고자 한다. 가장 기본적인 것은, 직접적으로 계측할 수 없는 상태정보는 관측기를 설계하여 추정함으로써 제어성능을 확보하도록 한다. 다양한 제어기설계법을 도입하고 비교평가를 통해 제안하는 제어기 설계법 및 제어전략 등의 우수성을 검증하도록 한다.

4.2 실험장치

4.2.1 실험용 선박

선박의 파일럿 선박은 Fig. 4-1에 나타난 것과 같고 자체 제작하였으며 실제 운항중인 선박의 100:1 축소 모델이다. 그림에 나타난 것과 같이 선박

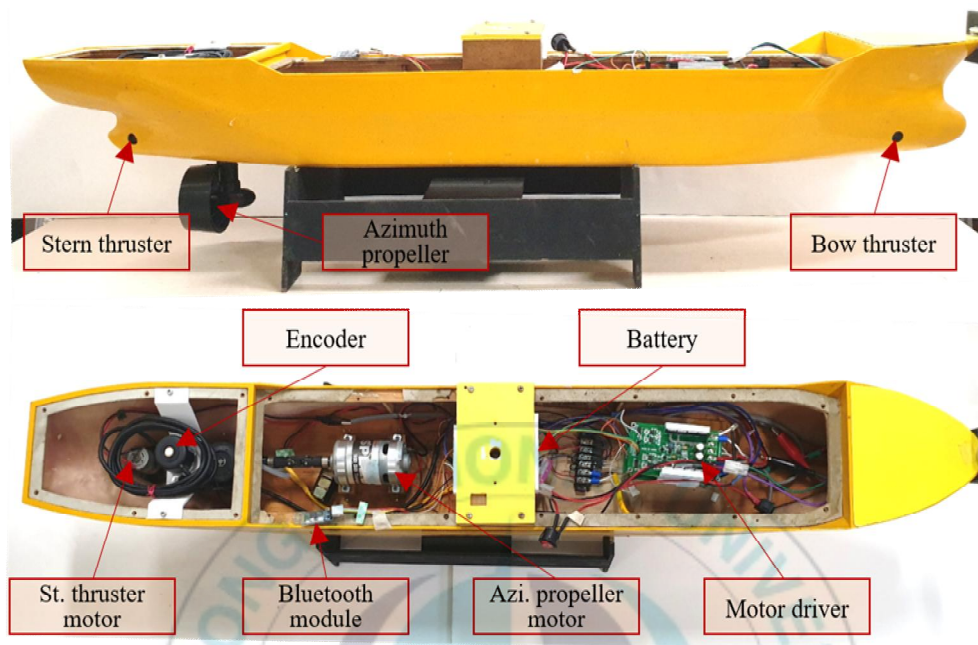


Fig. 4-1 Photos of the scaled vessel

선수 및 선미측에 바우(bow), 스텐(stern) 스러스터를 각각 장착하였다. 그리고 선미측에는 주추진장치로 아지무스 추진장치(azimuth propeller)를 장착하여 추진 및 러더(rudder)의 기능도 겸하고 있다.

4.2.2 제어계측 시스템

지금까지의 준비를 기초로 하여 실험을 수행한다. 이것을 기반으로 한 실험환경을 Fig. 4-2에 나타낸다. 그림에서와 같이 시험수조에서 모형선은 외부로부터의 전원공급 없이 선박자체에 설치된 배터리와 제어장치로 구동된다. 호스트 컴퓨터에서 미리 구성한 프로그램을 모형선박의 제어용 컨트롤러에 업로드하여 실행시킨다.

롤러(NI Compact Rio, Real time controller)에 로딩 시킴으로써 자체적으로 선박을 제어할 준비가 완료된다. 수조 상부에 설치된 카메라 선박의 정확한 현재 위치를 무선으로 통해서 제어용 컨트롤러에 전달되면 제어기는 motor driver를 통해서 각 액추에이터에 조화롭게 제어력을 분배하여 DC 모터를 구동하고 발생한 데이터를 무선으로 호스트 컴퓨터에 전달하는 구조이다.

그리고, Fig. 4-3에서와 같이 수조 상부(천정)에 카메라를 설치하여 선박 운동정보를 획득하여 실시간으로 호스트 컴퓨터로 전송한다. 전송된 이미지 정보는 이미지 프로세싱을 통해 선박의 실시간 운동상태를 계산하고 선박에 설치된 제어용 컨트롤러로 전송하여 운동제어를 위한 제어력 발생에 이용된다. 실험선박과 호스트 컴퓨터 간의 데이터 전송은 무선통신으로 이루어지며, 이미지 프로세싱 및 데이터 전송시간은 실시간 제어를 수행하기에 전혀 문제가 없다. 참고로 초당 40프레임 이상 처리할 수 있는 이미지 프로세싱 알고리즘을 자체 개발하여 활용하고 있다.

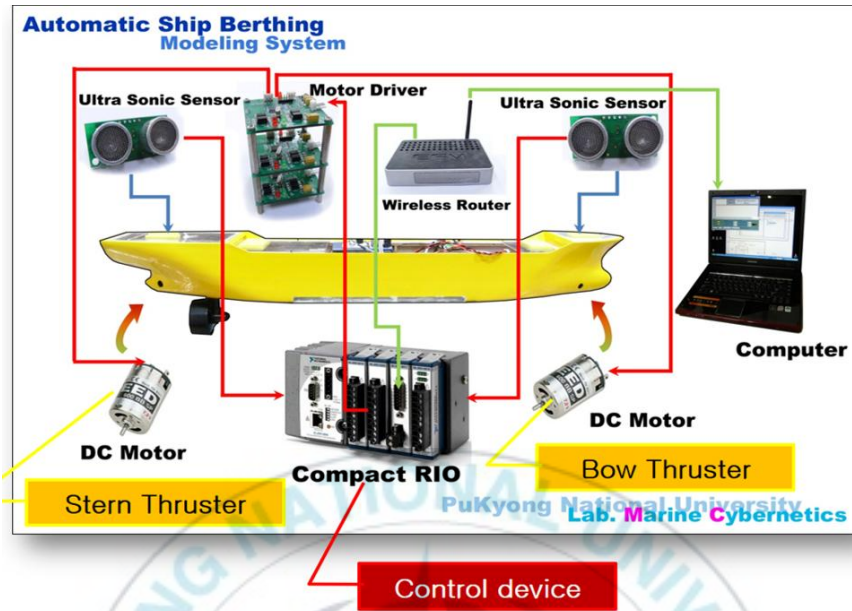


Fig. 4-2 Controlled vessel with control and measurement apparatus

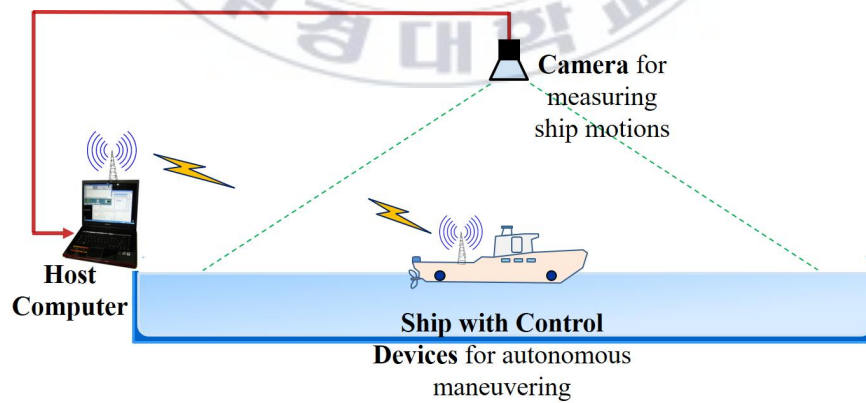


Fig. 4-3 System configuration for experiment

4.3 제어계 설계

지금까지의 이론적 연구를 기반으로 실험을 수행한다. 그러나, 선박운동 등 물리적 특성을 완벽하게 파악하는 것은 거의 불가능하기 때문에 직접적으로 계측할 수 없는 상태정보는 관측기를 설계하여 추정함으로써 제어성을 확보하고자 한다. 식 (3-1) ~ (3-6)까지의 표현을 이용하면 상태방정식 기본식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_r &= A_r x_r + B_r u_r \\ y_r &= C_r x_r + D_r u_r\end{aligned}\quad (4-1)$$

이때 상태 $x_r = [\nu, \eta]^T = [u, v, r, x, y, \psi]^T$, $u_r = [V_P, V_B, V_S]^T$ 와 같이 정의된다. 특히 입력 u_r 은 식 (3-6)에 나타낸 것과 같이, 각 추진장치 구동전압을 나타낸다. 그리고 식 (4-1)에서 각 상태행렬은 다음과 같다.

$$A_r = \begin{bmatrix} -M^{-1}D & 0 \\ R(\psi) & 0 \end{bmatrix}, \quad (4-2)$$

$$B_r = M^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & L_B - L_S \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_r = [0]$$

여기서 아지무스 프로펠러의 직압력 및 평행력(N, T)은 그 영향이 작은 것으로 하여 편의상 무시한다.

제어계 설계에 있어서 가장 기본적인 문제 중의 하나는 제어대상의 모델링 오차나 외란이 존재함에도 불구하고 목표신호에 오차없이 추종하도록 제어계를 설계하는 것이다. 이것을 강인서보문제(robust servo problem)라고 한다. 특히 본 연구에서 도입하는 제어계 설계법은 정상상태에서 추종 오차를 없애기 위한 최적서보계이다. 최적제어이론에 기반한 제어기 설계를 위해서는 상태정보가 필요하며, 직접 계측이 어려운 상태는 추정해야 한다. 선박운동제어를 위한 전체 제어시스템은 Fig. 4에 나타내었다. 제어 대상에 대한 기본식이 식 (4-1)과 같이 주어진다면, 상태 x_r 를 추정하기 위한 동일차원관측기는 일반적으로 다음과 같이 표현되는 것을 고려할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}_r = A_r \hat{x}_r + B_r u_r - L \{y_r - C_r \hat{x}_r\} \quad (4-3)$$

이때 $\hat{x}_r$ 는 식 (3-6)에서의 상태 x_r 의 추정값이며, L 은 $A_r + LC_r$ 을 안정하게 하는 이득이다. 최적제어이론 등의 설계기법을 이용하면 사양에 맞는 적당한 이득을 구할 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션과 실험을 반복적으로 수행하면서 적절한 이득을 구하였다.

Fig. 4-4에 나타낸 것과 같이, 추종제어계에는 상태를 관측하기 위한 관측기와 정상상태에서 추종오차를 없애기 위한 적분기를 포함하고 있다.

$$K_f = \begin{bmatrix} 4.940 & 0.0 & 0.0 & 57.2586 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 35.8117 & 0.0 & 0.0 & 79.0484 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 11.8814 & 0.0 & 0.0 & 61.3922 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$$K_w = \begin{bmatrix} 44.2719 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 44.2719 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 44.2719 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$$L = \begin{bmatrix} 2.8077 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1198 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2997 \\ 0.0108 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0022 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0040 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (4-6)$$

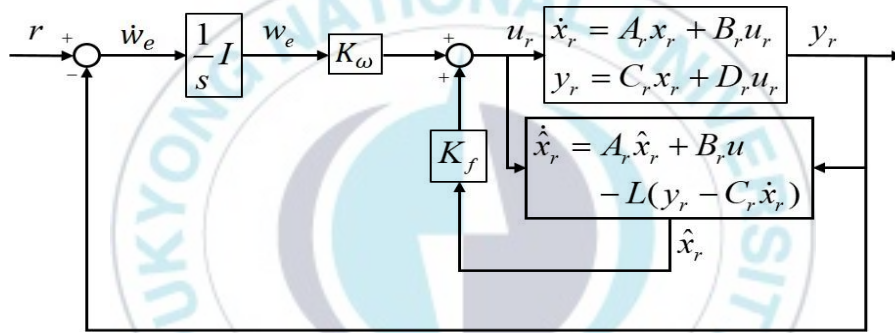


Fig. 4-4 Tracking control system incorporating an observer

4.4 실험 결과 및 평가

본 연구에서의 최종목표는 복잡한 항내에서의 안전한 선박접안을 위한 정교한 선박운동제어기술을 확보하는데 있다. 이를 위해서는 정상상태에서 과도한 오버슈트 현상 등 목표값을 벗어나는 동작은 허용되지 않는다. 이러한 제약은 제어기 설계 시 반드시 고려되어야 하며, 제어기 설계 및 시뮬

레이션 과정에서 충분히 검토하였다.

우선 실험을 수행하기 위해, 실험선박의 이동경로를 설정한다. 크게 두 가지 경로를 설정하였고 이것은 Fig. 4-5에 나타낸 것과 같다.

지금부터는 실험을 통해 설계된 제어계의 제어성능을 평가하도록 한다.

앞서 설명하였듯이 본 연구에서는 선박이 항해를 마치고, 항내로 진입하여 접안하는 과정에서의 선박운동을 적절히 제어하여 정해진 위치에 안전하게 정지하도록 하는 제어계를 구축하는 것에 목표를 두고 있다.

실험방법은, Fig. 4-5와 같이 초기위치 $[(x_{ij}, y_{ij}), j=1,2]$ 에서 출발하여, 목표지점 $[(x_{fj}, y_{fj}), j=1,2]$ 에 최종적으로 선박이 정지하도록 출발과 최종 도착지점을 설정하였다. 이때 최종적으로 도달해야할 목표지점 좌표로, case 1의 경우에는 $(x_{f1}, y_{f1}) = (0.9[m], -0.5[m])$, case 1의 경우에는 $(x_{f2}, y_{f2}) = (1.0[m], 0.6[m])$ 로 설정하였다. 이렇게 설정한 값들을 기반으로 실험선박을 이용하여 수조 내에서 실험을 수행하였다.

먼저 case 1과 설정된 경로에 대한 추종성능실험과를 Fig. 4-6에 나타내었다. case 1은, Fig. 4-5에 나타낸 것과 같이, 병진하면서 전진하는 운동성능을 평가한 것이다. 그림에서 (a)는 선박이 출발해서 최종지점에 도착하기까지의 선박의 이동경로를 나타내고 있다. (b)와 (c)에는 상태추정을 위해 도입한 관측기의 상태추정성능을 평가한 것이다. 특히 (b)는 선박이동경로에 대한 것이고, (c)는 선박 이동 중의 선수각 변화를 나타낸 것이다.

바람직한 추종성능을 확보하기 위해서는 적절한 상태정보가 필요하다. 그림에서 확인할 수 있는 것과 같이, 실제 선박이동경로와 관측기로 추정된 경로가 거의 일치하므로 설계한 관측기가 신뢰할 수준의 상태추정성능을 갖추고 있음을 알 수 있다.

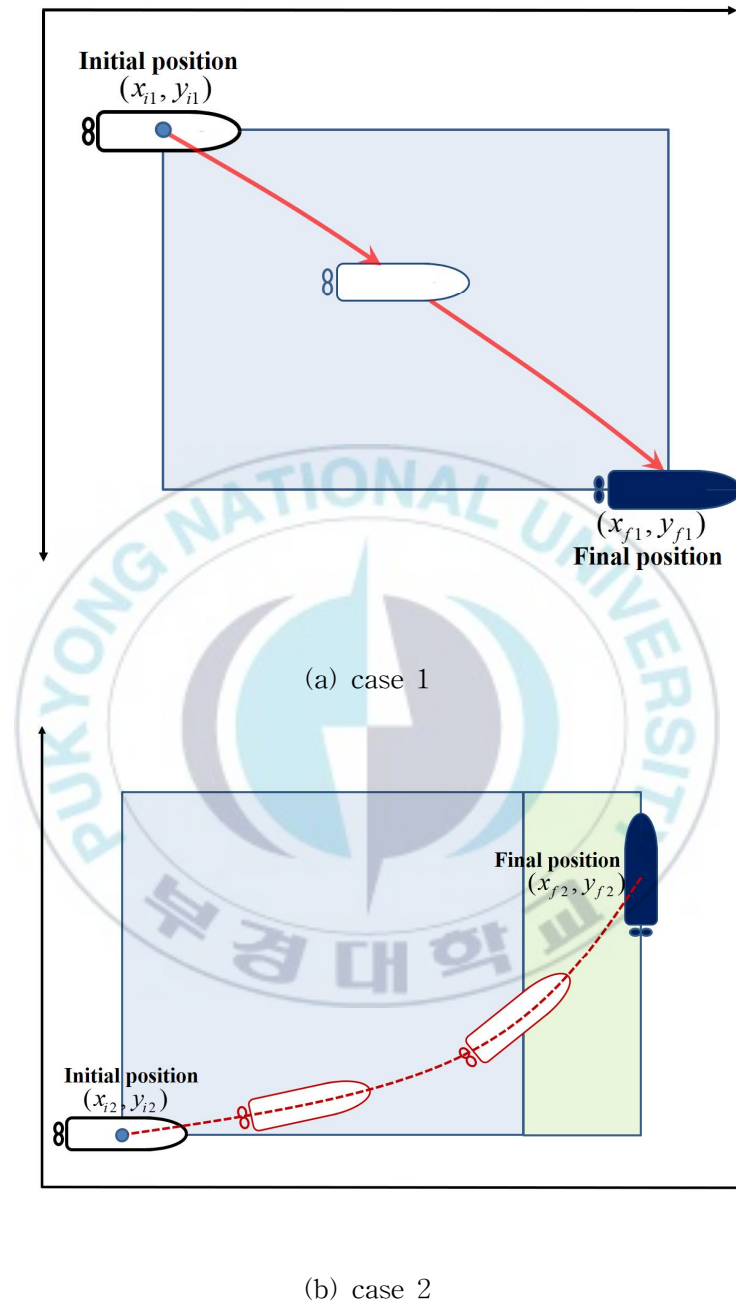
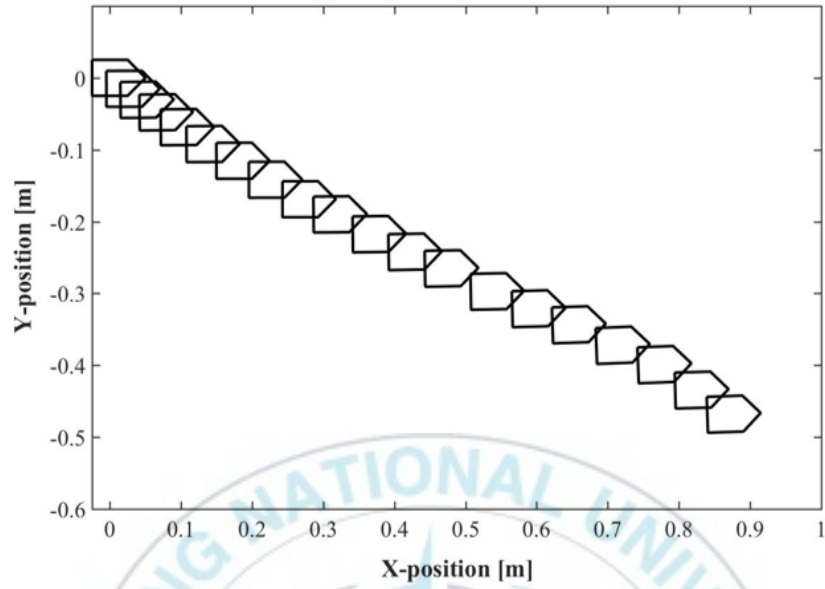
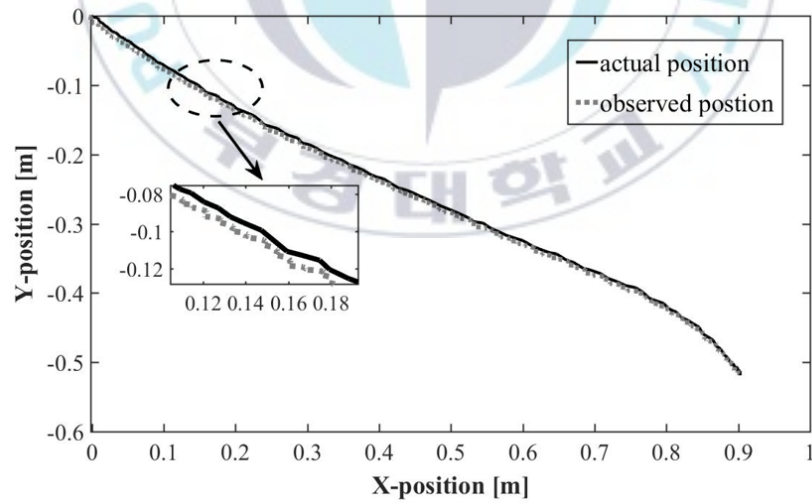


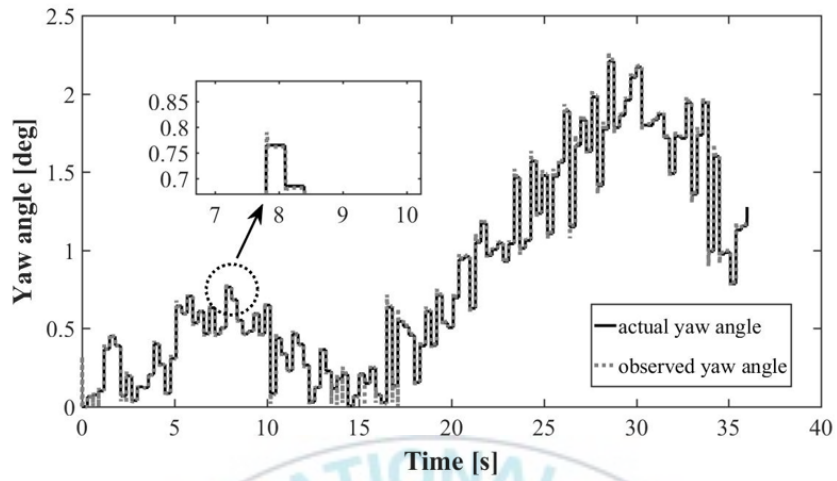
Fig. 4-5 Start and final approaching positions for experiment



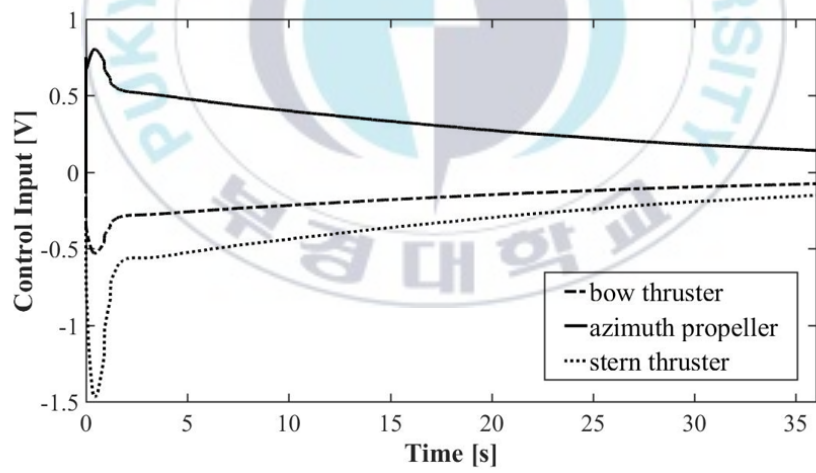
(a) vessel moving motion



(b) comparison result of real and estimated state

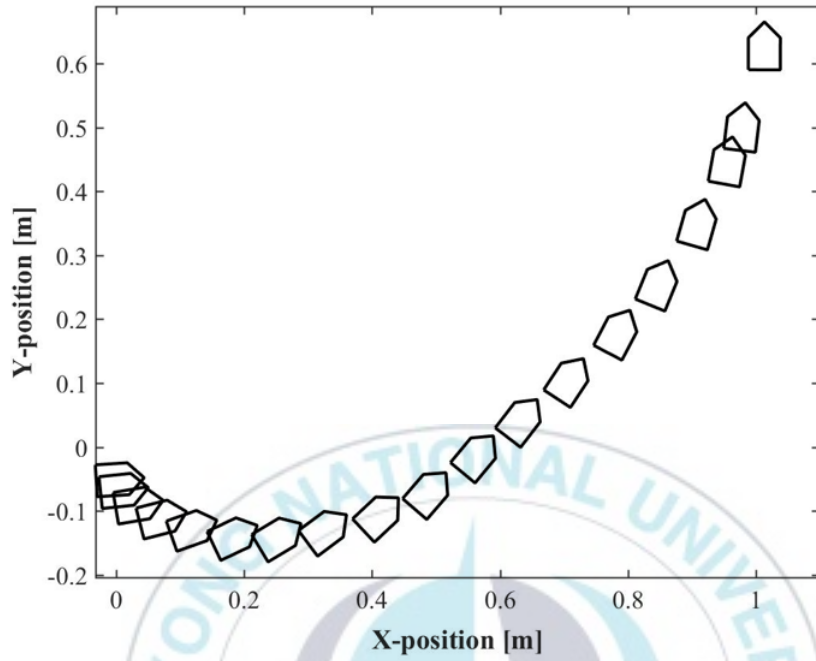


(c) yaw-angles : real and estimated

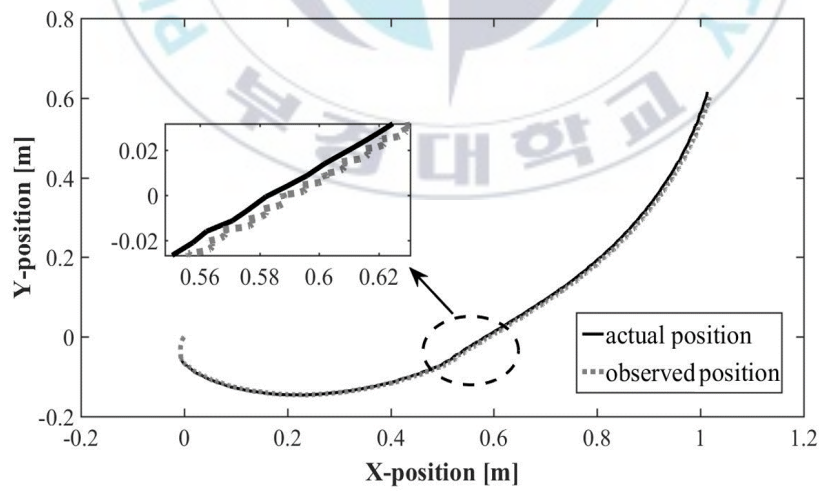


(d) control inputs for actuators

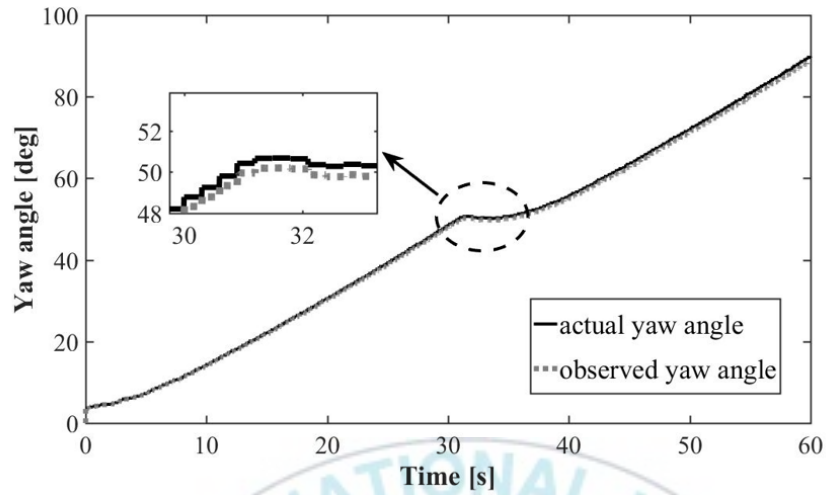
Fig. 4-6 Control performance and control inputs : case 1



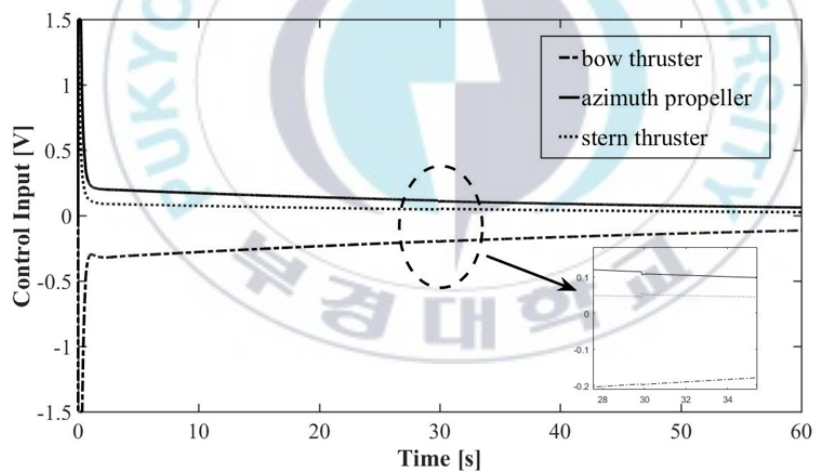
(a) vessel moving motion



(b) comparison result of real and estimated



(C) yaw-angles : real and estimated



(d) control inputs for actuators

Fig. 4-7 Control performance and control inputs : case 2

그리고 Fig. 4-7은 case 2의 경우를 나타낸 것이다. 출발지점에서 시작하여 최종적으로는 90° 선회한 후 최종지점에 정지하는 것이 제어목표이다. case 1의 실험과 같이, 최종지점에 도착하기까지의 선박운동제어성능, 상태추정성능 및 제어입력 등을 순서대로 Fig. 4-7에 나타내었다. 결론적으로 각 액추에이터 제어를 통해 선박운동을 제어하기 위한 제어력이 발생되고, 임의의 지점에서부터 최종도착지점까지 선박을 안전하고 정확하게 이동시킬 수 있음을 실험결과를 통해 확인하였다.

4.5 결론

본 장에서는, 이론연구를 기반으로 설계된 제어계 및 제안하는 선박운동 제어 전략 등의 유효성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다.

제어계는 기본적으로 상태피드백제어이론을 기반으로 하기 때문에 모든 상태정보가 필요하게 된다. 실험연구에서 일반적으로 도입되는 상태추정기를 본 연구에서도 설계하였다. 본 연구에서는 경로추정을 위한 제어계를 설계하여 정상상태에서의 추종오차를 없애고자 하였다. 그래서 상태추정을 위한 관측기를 포함한 최적 서보계로 선박운동을 제어하는 문제에 대해 고찰하였다. 실험을 통해 제안하는 제어기법으로 우수한 선박운동제어성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 복잡한 항내로 진입을 시작하여 안벽까지 이동 후 완전한 접안이 완료될 때까지의 선박운동제어문제에 관해 고찰하였다.

항만을 벗어난 넓고 선박통행이 적은 외항과 달리, 복잡하고 협소한 영역에서의 선박운동제어는 특히 어렵고 조심스러운 작업으로 현재까지는 터그보트 등의 지원을 통해 이루어진다.

이미 자율운항시스템에 대한 실증시험이 시작된 현재의 기술수준은 외항에서의 일반적인 자동운항의 개념을 넘어섰다. 즉, 자율운항시스템은 연구실환경에서의 실험단계를 넘어 이제 실용화를 바라볼 수 있는 수준에 이르렀다. 자율운항시스템의 완성을 위한 핵심기술은, 실시간 위치정보 및 운항환경정보를 이용하여 주어진 목표지점에 신속하고 안전하게 도달하는데 필요한 모든 기술이다. 즉, 자율운행자동차와 같은 개념으로 그 운용환경이 다르다는 것이 차이라면 차이라고 할 수 있다. 즉, 단순 무인운항기술뿐 만 아니라, 충돌회피 기술을 포함한 모든 안전기술이 포함된다.

관련하여, 선진외국에서는 어느 정도 필요기술을 확보하여 실증실험을 시도하고 있다. 그러나 국내기술 수준은 자율운항을 위한 가장 기본적인 분야에서도 원천기술조차 제대로 확보하고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 최종적으로는 완전한 자율운항시스템 기술을 개발한다는 것을 목표로, 이를 위한 관련분야 기초기술을 확보하는데 초점을 맞추고 있다.

즉, 자율운항이 가능한 시스템을 갖춘 선박모델을 대상으로

- (1) 가장 일반적인 수식모델을 구축하였다.
- (2) 실험을 위한 파일럿 모델 선박을 제작하고,
- (3) 수식모델을 기반으로 한 실험선박의 물리특성을 실험과 시뮬레이션으로 동정하였다.
- (4) 구축된 수식모델을 대상으로, 최적제어이론에 기반하여 제어계를 설계하고 시뮬레이션을 수행하였다.
- (5) 그리고, 실험선박을 대상으로 실험을 수행하여, 설계된 제어계의 제어 성능 및 제어전략에 대한 평가를 수행하였다.

시뮬레이션 및 실험에서는, 단순 외항환경에서의 자율운항개념이 아니라, 빈번하게 선박이 통행하거나, 이미 선박이 정박되어 운동에 많은 제약이 따르는 복잡한 항만환경을 고려하였다. 즉, 안벽으로부터 일정거리에서 접근을 시도하는 상황을 중점적으로 고려한 선박운동제어문제를 다루었다. 약간의 조종실수는 타 선박 혹은 안벽과의 충돌사고로 이어지므로 극도의 안정성이 확보되어야 한다. 이러한 상황과 제약을 고려하여 주어진 경로를 오차 없이 추종하고, 목표지점에 안전하고 가능한 신속하게 도달할 수 있도록 하는 제어기를 설계해야 한다. 본 논문에서는 이러한 목표를 충분히 달성할 수 있는 제어계설계 및 제어전략을 제안하였으며, 향후 보다 발전된 연구를 통해 선진해외기술 못지않은 수준의 기술 확보가 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] J. V. Amerongen and A. J. U. Ten Cate, 1975, "Model Reference Adaptive Autopilots for Ships", *Automatica*, Vol. 11, pp. 441-449.
- [2] J. V. Amerongen, H. R. V. Nauta Lemke and J. C. T. V. Der Veen, 1977, "An Autopilot for Ships Designed With Fuzzy Sets", *Digital Computer Applications to Process Control*, pp. 479-487.
- [3] C. G. Källström, K. J. Åström, N. E. Thorell, J. Eriksson and L. Sten, 1978, "Adaptive Autopilots for Large Tankers", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 11, pp. 477-484.
- [4] J. V. Amerongen and H. R. V. Nauta Lemke, 1978, "Optimum Steering of Ships With an Adaptive Autopilot", *Proceedings Fifth Ship Control Systems Symposium*, Vol. 3
- [5] L. Morawski and J. Pomirski, 1998, "Ship Track-keeping: Experiments With a Physical Tanker Model", *Control Engineering Practice*, Vol. 6, pp. 763-769
- [6] X. K. Zhang, X. L. Jia and X. C. Wang, 1995, "Robust Track-keeping Autopilot for Ships", *IFAC Proceedings*, Vol. 28-2, pp. 138-142.

- [7] E. Omerdic, G. N. Roberts and Z. Vukic, 2003, "A fuzzy Track-keeping Autopilot for Ship Steering", Journal of Marine Engineering & Technology, Vol. 2-1, pp. 23-35.
- [8] J. Velagic, Z. Vukic and E. Omerdic, 2003, "Adaptive Fuzzy Ship Autopilot for Track-keeping", Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 433-443.
- [9] Yamato H, Uetsuki H and Koyama T, 1990, "Automatic berthing by the neural controller", Proc. 9th Ship Control Systems Symposium, USA, Vol. 3, pp. 183-201.
- [10] H. Hasegawa and T. Fukutomi, 1994, "On Harbour Maneuvering and Neural Control System for Berthing with Tug operation", Proc. 3th International Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft, UK, pp. 197-210.
- [11] Y. Zhang, G. E. Hearn and P. Sen, 1997, "A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing", Journal of IEEE Control System, Vol. 17, No. 4, pp. 31-45.
- [12] Y. Zhang, G. E. Hearn and P. Sen, 1996, "A Neural Network Approach to Ship Track-Keeping Control", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 21-4, pp. 513-527.

- [13] N. K. Im and K. Hasegawa, 2002. "A Study on Automatic Ship Berthing Using Paraller Neural Controller(2nd Report) -Motion Identification Considering Lateral Speed and Angula Velocity to Cope With Disturbances-", IFAC Proceedings, Vol. 237, pp. 127-132.
- [14] V. S. Nguyen, V. C. Do and N. K. Im, 2018, "Development of Automatic Ship Berthing System Using Artificial Neural Network and Distance Measurement System", International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 19. No. 1, pp. 41~49.
- [15] Z. Qiang, Z. Guibing, H. Xin and Y. Renming, 2019, "Adaptive Neural Network Auto-bering Control of Marine Ships", Ocean Engineering, Vol. 177, pp. 40-48.
- [16] T. I. Fossen, 2002, Marine Control System : Guidance, Navigation, Rigs and Underwater Vehicle, Trondheim, Norway, Norwegian University of Science and Technology.
- [17] E. A. Tannuri and H. M. Morishita, 2006, "Experimental and Numerical Evaluation of a Typical Dynamic Positioning System", Applied Ocean Research, Vol. 28, pp. 133-146.
- [18] E. A. Tannuri, A. C. Agostinho, H. M. Morishita, and L. Moratelli Jr, 2010, "Dynamic Positioning Systems: An Experimental Analysis of Sliding Mode Control", Control Engineering Practice, Vol. 18, pp.

1121-1132.

- [19] M. Tomera, 2014, "Dynamic Positioning System for a Ship on Harbour Manoeuvring with Different Observers. Experimental Results", Polish Maritime Research, Vol. 21-3, pp. 13-24.
- [20] C. H. You, K. H. Chang, J. H. Lee and K. S. Kim, 2017, "Dynamical Behavior of the Correlation Between Meteorological Factors", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 71-12, pp. 875-879.
- [21] S. S. You, T. W. Lim, J. Y. Kim and H. S. Choi, 2017, "Robust Control Synthesis for Dynamic Vessel Positioning", Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 23-1, pp. 98-108.
- [22] Kasasbeh YA, Pourzanjani MM and Dove MJ, 1993, Automatic berthing of ship, Proc. of the Institute of Marine Engineers, the 3rd International Conference on Maritime Communications and Control, London, pp. 10-17.
- [23] N. Aksaka and M. Yamamoto, 1999, "Design Method of Ship's Track Keeping Control System and Verification by Field Test", Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers", Vol. 35, No. 7, pp. 934-942, 1999.

- [24] Takai T and Yoshihisa H, 1987, An automatic maneuvering system in berthing, Proc. 8th Ship Control System Symposium, Vol. 2, pp. 183-201.
- [25] Duc LM, 2001, An automatic control system for ship harbour manoeuvres using decoupling control, Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea.
- [26] Bu R, Liu Z and Li T, 2007, Non linear Sliding Mode Berthing control of underactuated surface ships, ICAA 2007, pp. 1371-1376.
- [27] V. P. Bui and Y. B. Kim, 2011, "Design of Sliding Mode Controller for Ship Position Control", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 17, No. 9, pp. 869-874.
- [28] V. P. Bui and Y. B. Kim, 2011, "Development of Constrained Control Allocation for Ship Berthing by Using Autonomous Tugboats, International Journal of Control Automation and Systems, Vol. 9, No. 6, pp. 1203-1208.
- [29] V. P. Bui and Y. B. Kim, 2012, "A Study on the Development of Dynamic Positioning System for Barge Type Surface Vessels", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 66-74.

- [30] K. H. Choi and Y. B. Kim, 2012, "A Study on the Robust Stability and Stabilization Problem for Marine Vessel", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 5, pp. 379-385.
- [31] S. W. Ji, V. P. Bui, B. Balachandran and Y. B. Kim, 2013, "Robust Control Allocation for Marine Vessel", Ocean Engineering, Vol. 63, pp. 105-111.
- [32] J. S. Jang and Y. B. Kim, 2012, "Nonlinear Observer Design for Dynamic Positioning Control of a Surface Vessel", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 79-85.
- [33] S. W. Ji, T. Y. Jeong and Y. B. Kim, 2013, "A Control Allocation Strategy Based on Multi-Parametric Quadratic Programming Algorithm", Journal of the Korean Society of Fisheries Technology, Vol. 49, No. 2, pp. 153-160.
- [34] Y. B. Kim, 2013, "A Positioning Mooring System Design for Barge Ship Based on PID Control Approach", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 94-99.
- [35] Y. B. Kim, 2014, "A Study on the Control System Design for Ship Mooring Winch System", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 3, pp. 1065-1072.

- [36] S. W. Ji, M. S. Choi and Y. B. Kim, 2015, "A Study on Position Mooring System Design for the Vessel Moored by Mooring Lines", IEEE-ASME Transactions On Mechatronics, Vol. 20, No. 6, pp. 2824-2832.
- [37] A. M. Tran, S. H. Jeong, J. I. Yoon and Y. B. Kim, 2016, "Vessel Motion Control Using Rope Tension Control Strategy", International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 915-923.
- [38] V. P. Bui, J. S. Jeong, Y. B. Kim and D. W. Kim, 2010, "Optimal Control Design for Automatic Ship Berthing by Using Bow and Stern Thrusters", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 24, No. 2, pp. 10-17.
- [39] K. H. Kim, B. G. Kim and Y. B. Kim, 2018, "A Study on the Optimal Tracking Control System Design for Automatic Ship Berthing", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 72-80.
- [40] K. H. Kim, Y. B. Kim and S. W. Ji, 2018, "A study on the motion control design for autonomous ship", Journal of the Korean Society of Fisheries Ocean Technology, Vol. 54, No. 3, pp. 231-238.

- [41] K. H. Kim, J. H. Suh and Y. B. Kim, 2019, “A study on the motion control system design for developing autonomous system: Experimental study”, Journal of the Korean Society of Fisheries Ocean Technology, Vol. 55, No. 2, pp. 172-180.
- [42] B. K. LEE, 2005, “Optimal Route Decision and LOS Guidance System for Automatic Navigation of Ships”, Doctoral thesis, Korea Maritime and Ocean University.



감사의 글

먼저 많은 분들의 도움을 받아 논문이 나오게 됨을 감사드립니다. 학부와 석사과정을 통해서 도움을 주신 학과 교수님들과 안수길 교수님, 고대권 교수님께 진심을 담아 감사드립니다.

부족한 저에게 다시 용기를 주시고 아낌없는 조언과 도움을 주신 김영복 교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 또한 이 논문을 심사하여 완성될 수 있도록 바쁜신 중에도 귀중한 시간을 할애해 주신 정석호 교수님, 류지열 교수님, 옥수열 교수님께도 지면을 빌어 깊은 감사의 인사를 드립니다. 이미 은퇴하신 기계시스템공학과 원로 교수님들에게도 건강을 기원하며 감사를 드립니다. 실험실에서 늘 최선을 다하며 열심히 학문에 정진하고 있는 이동훈, 김태완군에게 심심한 감사를 드리고 타국에서 가족과 멀리 떨어져 살면서 최선을 다하고 열심히 학문의 길을 가고 있는 유학생들의 도움에도 진심 어린 감사를 드립니다.

긴 시간 생사고락을 같이 하고 한 식구 같았던 부경대학교 실습선 가야호와 탐사선 나라호 직원들과 공경주군, 함께 열심히 백경호를 만들고 있는 박치완 감독의 배려에 감사를 드리고 건승을 빕니다.

늘 씩씩한 딸과 늘 기대되는 아들, 평강공주와 같은 아내에게 고마운 마음을 가지고 살고 있습니다. 우애 있게 살고 있는 형님들과 누나들 또한 처갓집 식구들에게 감사하고 구순이 넘는 나이에든 언제나 맑은 정신으로 통화할 수 있는 어머님께도 감사의 뜻을 전합니다. 부산성결교회 목사님과 교우들에게도 깊은 감사드립니다.

2019년 8월

김 경 현