



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](#)

공학석사 학위논문

선박 호송항법시스템에 관한 기초 연구

A Basic Study on Convoy Navigation System



지도교수 전 승 환

2020 년 2 월

한국해양대학교 대학원

항해학과

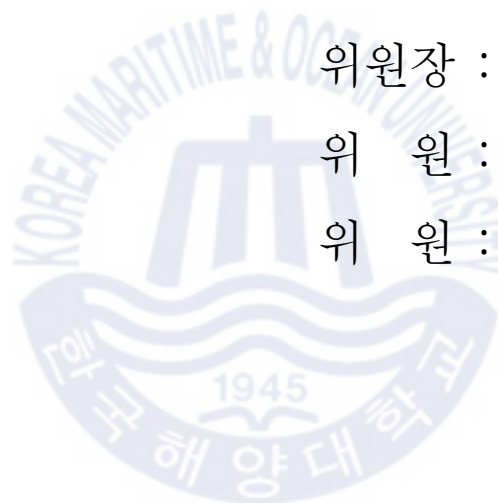
최 원 진

본 논문을 최원진의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 정 기 룡 (인)

위 원 : 양 원 재 (인)

위 원 : 전 승 환 (인)



2019 년 12 월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii

1. 서 론	1
2. 실험선박	4
2.1 선박제원	4
2.2 선박시스템 구성	5
2.2.1 추진시스템	6
2.2.2 조타시스템	8
2.2.3 데이터처리시스템	9
3. 호송항법시스템	13
3.1 경로설정 알고리즘	13
3.2 타각제어 알고리즘	18
3.2.1 선박조종운동 방정식	18
3.2.2 디지털 제어기 설계	25
3.2.3 알고리즘 검증	29
3.3 속력제어 알고리즘	32

4. 실험 및 결과	34
5. 결 론	41
참고문헌	43



List of Tables

Table 2.1 Ship particulars	5
Table 2.2 Propulsion equipment specifications	6
Table 2.3 Propeller condition according to pulse width	7
Table 2.4 Servo motor specifications	8
Table 2.5 GPS sensor specifications	10
Table 2.6 Arduino Uno specifications	11
Table 2.7 Raspberry Pi 3 Model B+ specifications	12
Table 3.1 Comparison between Plane sailing and Middle latitude sailing	17
Table 3.2 PD controller parameters	28
Table 3.3 Predetermined waypoints	29
Table 4.1 Starting point and waypoints of master ship	34

List of Figures

Fig. 2.1 Experimental boat(master ship)	4
Fig. 2.2 Experimental boat(slave ship)	4
Fig. 2.3 Experimental boat system configuration	6
Fig. 2.4 Propulsion system configuration	7
Fig. 2.5 Steering system configuration	8
Fig. 2.6 Data processing system configuration	9
Fig. 2.7 Microcomputer(Raspberry Pi 3 Model B+)	10
Fig. 2.8 Microcontroller(Arduino Uno)	11
Fig. 2.9 GPS sensor(NEO-M8N)	12
Fig. 3.1 Data communication algorithm flowchart(microcomputer)	14
Fig. 3.2 Master ship routing algorithm flowchart(microcontroller)	15
Fig. 3.3 Middle latitude sailing	16
Fig. 3.4 Sea test site	20
Fig. 3.5 Master ship trajectory on turning test	20
Fig. 3.6 Slave ship trajectory on turning test	21
Fig. 3.7 Rudder angle and turning rate of master ship on turning test •	22
Fig. 3.8 Rudder angle and turning rate of slave ship on turning test	22
Fig. 3.9 Turning rate by sea test(r_m) and ARX model(r) of master ship	24
Fig. 3.10 Turning rate by sea test(r_m) and ARX model(r) of slave ship	24
Fig. 3.11 Digital PD controller block diagram	25
Fig. 3.12 Relay feedback tuning method block diagram	26

Fig. 3.13 Critical oscillation graph(master ship)	27
Fig. 3.14 Critical oscillation graph(slave ship)	27
Fig. 3.15 Master ship trajectory during rudder control algorithm test	30
Fig. 3.16 Master ship rudder angle during rudder control algorithm test	30
Fig. 3.17 Slave ship trajectory during rudder control algorithm test	31
Fig. 3.18 Slave ship rudder angle during rudder control algorithm test ..	31
Fig. 3.19 Speed control algorithm flowchart	32
Fig. 4.1 Log data at the first sea trial	35
Fig. 4.2 Master and slave ships trajectories during the first sea trial	36
Fig. 4.3 Master ship rudder angle and motor pulse width during the first sea trial	37
Fig. 4.4 Slave ship rudder angle and motor pulse width during the first sea trial	37
Fig. 4.5 Log data at the second sea trial	38
Fig. 4.6 Master and slave ships trajectories during the second sea trial	39
Fig. 4.7 Master ship rudder angle and motor pulse width during the second sea trial	40
Fig. 4.8 Slave ship rudder angle and motor pulse width during the second sea trial	40

A Basic Study on Convoy Navigation System

Choi, Wonjin

Department of Navigation Science
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

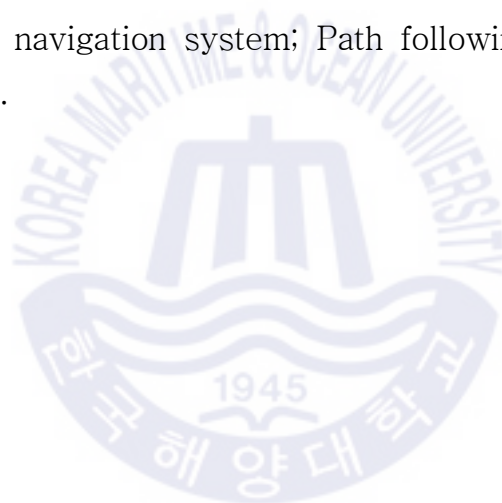
This study proposes a convoy navigation system in which one manned ship leads several unmanned ships as part of the development of Maritime Autonomous Surface Ships(MASS). As a basic study, we developed convoy navigation system which is configured that if a master ship sends its GPS data to a slave ship via wireless LAN during a master ship autonomously navigates along the predetermined waypoint, or manually sails, the slave ship navigates along the master ship with proper distance.

To develop convoy navigation system, two commercial RC model boats were remodeled with propulsion system, steering system and data processing system. Routing algorithm for calculating course and distance, PD controller based on the Nomoto and ARX model to control the rudder, and speed control algorithm for maintaining the distance between ships were designed and integrated into the boat.

In order to verify the validity, sea test were conducted using two RC model boats equipped with convoy navigation system. Despite the influence of the external environment such as waves and winds, the slave ship follows the path of master ship while maintaining a certain distance.

However, it was difficult to obtain accurate data for experiments with two model boats of about 1 m in open waters directly affected by external influences such as wave and wind. This will be supplemented later by experiments in open and calm water where GPS signals are received, thereby improving the reliability of convoy navigation system.

KEY WORDS: Convoy navigation system; Path following; Nomoto model; PD controller; ARX model.



선박 호송항법시스템에 관한 기초 연구

최 원 진

한국해양대학교 대학원

항해학과

초 록

본 연구는 자율운항선박 개발의 일환으로 한 척의 유인호송선이 여러 척의 무인 추종선을 이끄는 호송항법시스템을 제안한다. 기초 연구로써 한 척의 호송선이 이미 설정된 변침점을 따라 자율항해하거나 또는 무작위로 항해하면서 자선의 항행 데이터를 무선으로 추종선에 보내면, 추종선이 이 정보를 기반으로 호송선과 일정한 거리를 유지하면서 호송선을 추종하도록 구성된 호송항법시스템을 개발하였다.

시스템 개발을 위해 시판 중인 두 대의 RC모형보트를 개조하여 추진시스템, 조타시스템 그리고 데이터처리시스템을 탑재하였다. 그리고 침로와 항정을 계산하는 경로설정 알고리즘, 노모토 모델과 ARX 모델을 기반으로 구현된 비례-미분 제어기, 선박 간 거리유지를 위한 속력제어 알고리즘을 설계하고 통합하여 실험보트에 탑재하였다.

호송항법시스템의 유효성을 검증하기 위해 시스템이 탑재된 두 대의 RC모형보트를 이용해 해상실험을 수행하였으며 파도, 바람 등 외부 환경의 영향에도 불구하고 추종선이 호송선과 일정 거리를 유지하며 경로를 추종하는 결과를 얻었다.

그러나 너울, 바람 등의 외부 영향을 직접 받는 개방된 수역에서 1m 내외의 모형보트 두 대로 실험을 진행하기에는 정확한 데이터를 획득하는 것에 어려움이 있었다. 이는 추후 GPS 신호가 수신되는 개방된 정온수역에서의 실험으로 보완할 것이며, 이를 통해 호송항법시스템의 신뢰성을 향상하고자 한다.

KEY WORDS: 호송항법시스템; 경로추종; 비례-미분 제어기; 노모토 모델; ARX 모델.



제 1 장 서론

2016년 세계경제포럼(World Economic Forum)에서 제4차 산업혁명이라는 용어가 언급된 이후, 여러 산업 분야에서는 제4차 산업혁명시대에 대응하기 위한 다양한 전략과 정책을 수립하고 있다. 그중, 자율운항선박(Maritime Autonomous Surface Ships, MASS)은 제4차 산업혁명시대에 해사 산업의 게임 체인저(Game changer)로 주목받고 있으며, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 자율운항선박을 도입하기 위해 2018년 제99차 해사안전위원회(Maritime Safety Committee)를 통해 자율운항선박에 대한 정의를 내리고 자율화의 단계를 구분하였다 (IMO, 2018).

이에 따라 자율운항선박의 도입을 위한 기술개발도 활발히 진행되고 있다. 김효일 (2011)은 길이 1,325 mm, 무게 8.16 kg의 개조된 소형 무인선박을 고속 하향 패킷 접속(High Speed Downlink Packet Access) 무선인터넷을 이용하여 원격에서 제어하는 시스템과 설정된 변침점을 스스로 찾아가는 기능을 구현하였으며, 해상실험을 통하여 검증하였다. 그리고 Shin, et al. (2017)은 기구학적(Kinematic) 및 동역학적(Dynamic) 모델(Model)을 통해 길이 5.00 m, 무게 600 kg인 개조된 어선의 속도유지 및 침로추종을 위한 적응 제어기를 구현하였다. 그리고 해상실험을 통해 실험선박이 설정된 변침점을 일정한 속력으로 추종하는 것을 확인하였다.

세계 주요국에서는 다양한 기업들이 협업을 통해 자율운항선박의 개발을 진행하고 있다. 대표적으로, 노르웨이는 Yara International이 Kongsberg와 공동으로 근거리 연안을 자율적으로 항해할 수 있는 Yara Birkeland호를 개발하였다. 전기추진 컨테이너선박인 Yara Birkeland호는 2020년 초에 진수될 예정으로, 시험운항을 거쳐 2022년까지 완전 자율운항의 완성을 목표로 하고 있다 (Yara international, 2018). 유럽연합(European Union)은 2012년부터 독일, 노르웨이, 스웨덴 등 유럽의 다양한 연구팀이 참여한 Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Network(MUNIN) project를 추진하여 자율운항선박의 핵심기술들을 개발하고 있다. 영국의 Rolls-Royce는 Goggle, Inmarsat 등의 전문기업들과 협력하여 2020년 원격 조종 기술, 2025년 내 항선 무인화, 그리고 2030년에 원양선박의 완전 무인화를 목표로 기술개발 중이다 (한국해양수산개발원, 2018). 일본의 NYK Line은 자율운항선박 시험운항에 대한 임시 지

침(Interim guidelines for MASS trials) (IMO, 2019)에 따라 총톤수 70,826 톤의 자동차운 반선 Iris leader호의 유인 자율운항선박 시험에 성공하였다 (NYK Line, 2019). 한국은 자율운항선박 핵심기술을 개발하고, 체계적인 실증을 통한 조기 상용화 기반을 마련하기 위한 자율운항선박 기술개발 사업을 2020년부터 6년간 추진한다 (해양수산부, 2019).

자율운항선박은 경제성에서 큰 강점을 지니고 있어 국가와 기업 차원에서의 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 자율운항선박 기술력은 연안 항해가 가능한 수준까지 이르렀다고 할 수 있다. 그러나 선체유지보수, 무결점 통신, 해적 등으로부터의 보안이나 사고발생 시 긴급대처능력 등에서 많은 문제점을 지니고 있어 원양선박의 완전 무인화까지 더 많은 시간이 요구될 것으로 여겨진다. 이러한 문제점들을 극복하기 위한 방안으로 한 척의 유인선박과 여러 척의 무인선박을 결합하는 수송시스템이 개발되고 있으며, 이와 관련된 연구내용을 살펴보면 다음과 같다.

Hannu, et al. (1998)은 기계가 완벽히 자율적인 수행이 가능하지 않을 때 사람이 직접 조종하는 차량(Master)이 하나 혹은 여러 대의 무인차량(Slave)을 이끌어 무인차량에 예상치 못한 문제가 발생했을 때 올바르게 대처할 수 있게 하는 호송항법(Convoy navigation)을 제시하였고, 시뮬레이션 및 육상실험을 통해 검증하였다. 그리고 Liu and Bucknall (2015)은 한 척의 지휘(Leader) 선박과 두 척의 추종(Follower) 선박으로 선박 편대(Formation)를 구성하고, 지휘(Leader) 선박이 움직이는 선박을 피해 정해진 경로를 추종하면 두 척의 추종(Follower) 선박이 적합한 형태의 편대(formation)를 이루어 지휘(Leader) 선박의 경로를 추종하는 알고리즘을 구현하였고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 논문에서는 호송대(Convoy), 편대(Formation)로 불리는 기존의 연구방법을 호송항법시스템(Convoy navigation system)이라고 이름 붙이고, 구현 및 검증을 통해 자율운항선박 개발을 위한 연구의 한 방법으로 제시하고자 한다. 기초 연구로써 선박을 이끄는 한 척의 호송선(Master ship)과 호송선을 따르는 한 척의 추종선(Slave ship)으로 구성된 호송항법시스템을 경로설정, 타각제어 및 속력제어 알고리즘을 탑재한 두 대의 RC모형보트를 통해 구현하고자 하며, 해상실험을 통해 그 유효성을 검증하고자 한다.

일반적인 논문의 경우 이론적 배경 설명 후 실험재료 및 방법에 관하여 서술하지만, 본 논문은 모형보트의 특성을 파악하고 그에 적합한 시스템을 구현하기 때문에 구성에 차이가 있다. 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 제2장에서는 연구에 사용된 RC 모형보트 두 대를 소개하고 선박의 제원과 시스템 및 장비에 대해 자세히 서술한다. 그리고 제3장에서는 호송항법시스템을 구현하기 위한 경로설정, 타각제어 및 속력제어 알고리즘 설계에 관해 서술하며, 제4장에서는 해상실험을 통해 호송항법시스템의 유효성을 검증한다. 마지막으로 제5장에서는 본 연구에 대한 결론과 추후 연구과제에 관해 기술한다.



제 2 장 실험선박

2.1 선박제원

호송항법시스템을 개발하기 위하여 시판 중인 두 대의 RC모형보트(Radio control boat)를 연구 목적에 맞게 개조하였다. Fig. 2.1은 다른 선박을 이끄는 호송선(Master ship)으로 사용된 단동선(Monohull) 형태의 RC보트로 타(Rudder)가 선체 중심에서 오른쪽으로 치우쳐있는 특징이 있다. Fig. 2.2는 호송선의 경로를 추종하는 추종선(Slave ship)으로 사용된 쌍동선(Catamaran) 형태의 RC보트이다.



Fig. 2.1 Experimental boat(master ship)



Fig. 2.2 Remodeled boat(slave ship)

RC보트에는 BLDC 모터(Brushless direct current motor), 서보모터(Servo motor), 전자변속기(Electric speed controller) 등이 내장되어 있으며, 여기에 센서(Sensor) 및 제어기 등을 추가로 탑재하였다. Table 2.1에 두 보트의 세부 사양을 비교하여 나타낸다.

Table 2.1 Ship particulars

Items		Feature	
		Master ship	Slave ship
Boat type		Monohull	Catamaran
Built-in equipment		BLDC motor, Electric speed controller, Propeller, Servo motor, Rudder, RF receiver	
Additional equipment		GPS sensor, Microcomputer, Microcontroller	
Hull material		ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)	Fiberglass
Speed		50+ kn	55+ kn
Size	Length	914.4 mm	1,245 mm
	Breadth	279.4 mm	440 mm
	Height	161 mm	252 mm
Weight		3.7 kg	8.9 kg

2.2 선박시스템 구성

두 대의 실험보트는 시스템 구성이 동일하며, Fig. 2.3과 같이 전자변속기와 BLDC 모터 및 프로펠러로 구성된 추진시스템(Propulsion system), 서보모터와 타(Rudder)로 구성된 조타시스템(Steering system), 마이크로컴퓨터(Microcomputer)와 마이크로컨트롤러(Microcontroller)로 구성된 데이터처리시스템(Data processing system)과 GPS 센서 및 RF(Radio frequency) 수신기로 이루어져 있다.

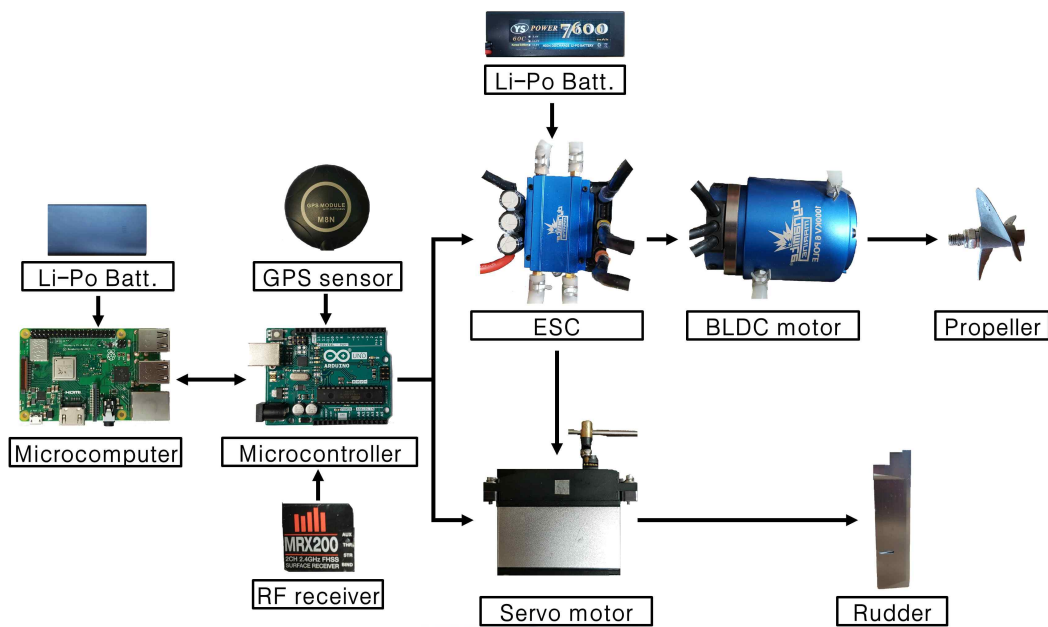


Fig. 2.3 Experimental boat system configuration

2.2.1 추진시스템

추진시스템은 전자변속기, BLDC 모터, 프로펠러로 구성되어 있으며, 펄스 폭 변조 (Pulse width modulation) 방식을 사용하여 제어하였다. Table 2.2에 추진시스템의 장비 사양을 나타내며, Fig. 2.4에 추진시스템의 구성을 나타낸다.

Table 2.2 Propulsion equipment specifications

Items		Feature	
		Master ship	Slave ship
Brushless DC motor	Pole	4	6
	RPM	1,900 / V	1,000 / V
Electric speed controller	Output current	120 A	160 A
	Input	2-6S LiPo battery	2-8S LiPo battery
	Running mode	Forward / Backward	
Propeller	Diameter	40.64 mm	35.56 mm
	Pitch	43.94 mm	50.8 mm

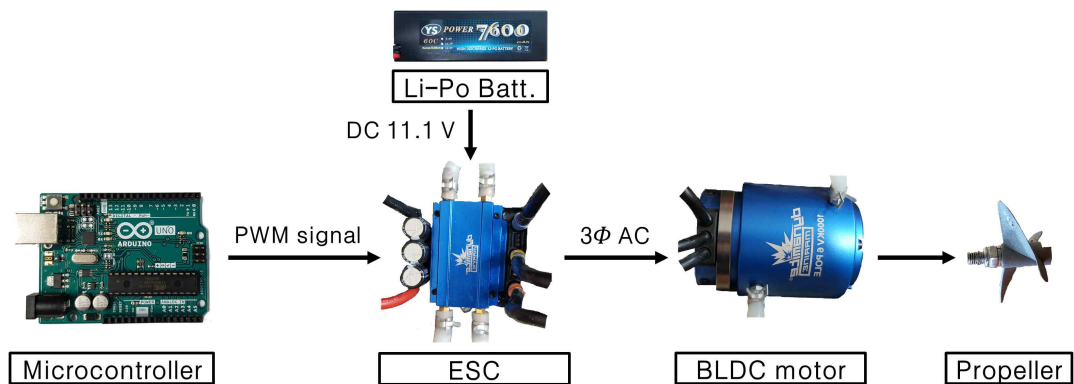


Fig. 2.4 Propulsion system configuration

추진시스템의 전자변속기는 리튬 폴리머 배터리(Lithium-polymer battery)에서 공급 받는 11.1 V의 직류(DC) 전기를 3상 교류(AC) 전기로 변환시켜 BLDC 모터에 공급하며, 모터의 토크(Torque)는 샤프트(Shaft)를 통해 프로펠러로 전달되어 추진한다. 마이크로컨트롤러는 주파수가 50 Hz인 신호의 펄스 폭을 변화시켜 전자변속기에서 BLDC 모터로 공급하는 교류 전원의 진폭을 조절한다. 이에 따라 프로펠러의 회전수 및 회전 방향이 달라지며, 펄스 폭에 따른 프로펠러 상태를 Table 2.3에 나타낸다.

Table 2.3 Propeller condition according to pulse width

Pulse width range	Propeller condition	Propulsion direction
pulse width < 1,450 μ s	Anticlockwise	Backward
1,450 μ s $\leq$ pulse width $\leq$ 1,550 μ s	Stop	Stop
pulse width > 1,550 μ s	Clockwise	Forward

전자변속기가 수신한 신호의 펄스 폭의 범위가 1,450 μ s에서 1,550 μ s이면 프로펠러는 정지한 상태를 유지하고, 1,450 μ s보다 작아지면 프로펠러는 시계반대방향으로 회전하며, 1,550 μ s보다 커지면 시계방향으로 회전한다. 또한, 펄스 폭이 1,450 μ s보다 작아지거나 1,550 μ s보다 커질수록 BLDC 모터의 분당회전수(Revolution per minute)가 더 높아진다.

2.2.2 조타시스템

조타시스템은 서보모터와 타로 구성되어 있으며, 추진시스템과 마찬가지로 펄스 폭 변조 방식을 사용하여 제어하였다. Fig. 2.5에 조타시스템의 구성을 나타내며, Table 2.4에 서보모터의 사양을 나타낸다.

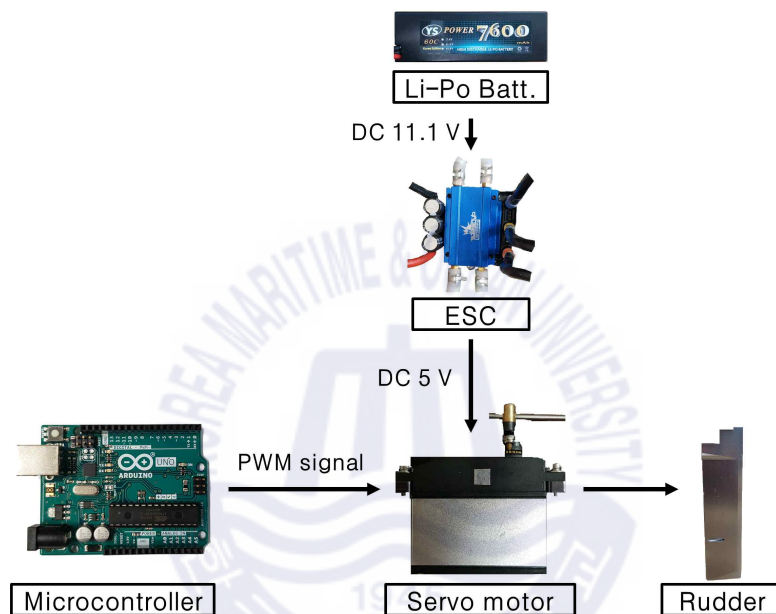


Fig. 2.5 Steering system configuration

Table 2.4 Servo motor specifications

Items		Feature	
		Master ship	Slave ship
Servo motor	Torque	161 oz/in @ 6V	490 oz/in
	Speed	0.24 sec @ 6V	0.216 sec @ 6V

조타시스템의 서보모터는 전자변속기의 BEC(Battery eliminator circuit)를 통해 5 V의 직류 전기를 공급받으며, 서보모터의 토크는 타로 전달되어 타를 조종한다. 그리고 타

각은 마이크로컨트롤러에서 서보모터로 송신하는 펄스 폭 변조 신호의 펄스 폭에 따라 달라진다. 타각은 펄스 폭이 $1500\ \mu\text{s}$ 일 때 타각은 0° 인 중립(Midship) 상태를 유지하며, $10\ \mu\text{s}$ 증가할 때마다 우현으로 1° 씩 회전하고 $10\ \mu\text{s}$ 감소할 때마다 우현으로 1° 씩 회전한다.

2.2.3 데이터처리시스템

데이터처리시스템은 마이크로컴퓨터와 마이크로컨트롤러로 구성되어 센서데이터 수집, 보트 사이의 통신, 추진 및 조타시스템 제어, 경로 계산 등의 역할을 한다. GPS 센서는 경로 계산에 필요한 보트의 위치 정보를 수집하고, RF 수신기는 RF 조종기의 무선 신호를 입력받아 수동으로도 실험보트의 조종이 가능하게 한다. 센서 및 데이터처리시스템의 구성은 Fig. 2.6과 같다.

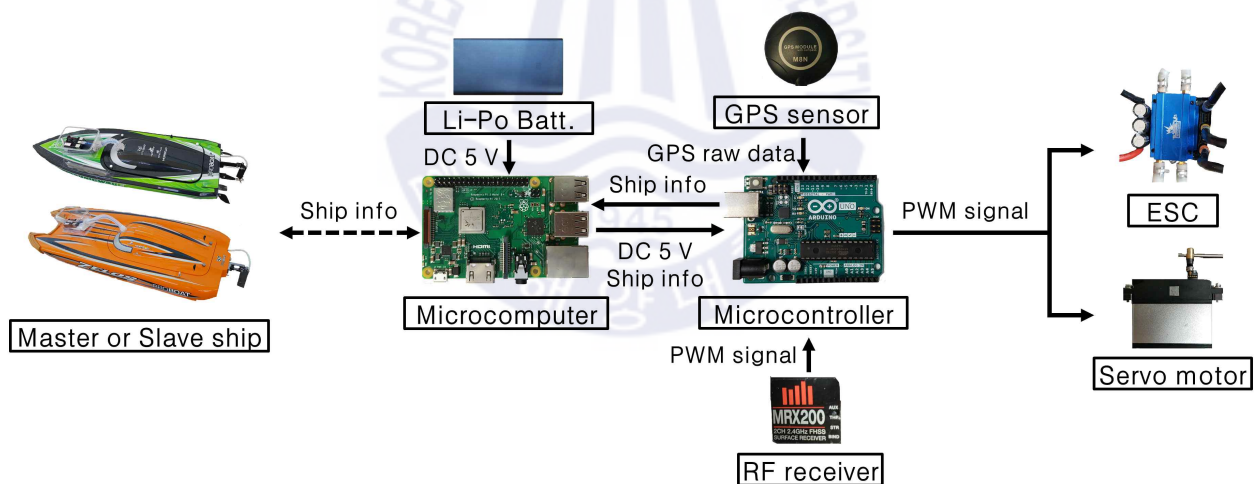


Fig. 2.6 Data processing system configuration

마이크로컴퓨터는 5 V 직류 전기에 의해 작동하며, 마이크로컨트롤러와는 직렬 (Serial) 통신, 다른 보트의 마이크로컴퓨터와는 무선랜(Wireless LAN)을 통해 위치 정보를 주고받는다. 주고받은 두 보트의 데이터는 플래시 메모리(Flash memory)인 SD 카드(Secure digital card)에 텍스트 파일(Text file)로 저장된다. Fig. 2.7은 본 연구에서 마이크로컴퓨터로 사용한 라즈베리파이(Raspberry Pi 3 Model B+)이며, 주요 사양은 Table 2.5와 같다.

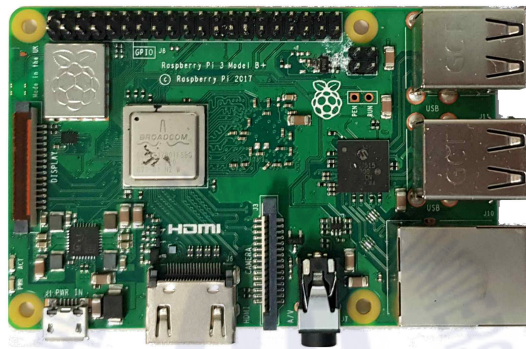


Fig. 2.7 Microcomputer(Raspberry Pi 3 Model B+)

Table 2.5 Raspberry Pi 3 Model B+ specifications

Items	Feature
CPU	Broadcom BCM28/37B0, Cortex-A52 64-bit SoC @ 1.4 GHz
Memory	1 GB LPDDR2 SDRAM
Input Power	5 V, 2.5 A DC
I/O Pins	40-pin GPIO
Wireless Lan	2.4 and 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac
Bluetooth	4.2, BLE
Operating Temperature	0-50 °C
Storage	Micro SD
Weight	50 g

마이크로컨트롤러는 마이크로컴퓨터로부터 5 V 직류 전기를 공급받아 동작하며, GPS 센서 및 RF 수신기의 데이터를 수신하고, 마이크로컴퓨터와 위치 정보를 주고받는다. 또한, 경로설정 및 추종 알고리즘을 수행하여 추진 및 조타시스템을 제어한다. Fig. 2.8은 본 연구에서 마이크로컴퓨터로 사용한 아두이노 우노(Arduino Uno)이며, 주요 사양은 Table 2.6과 같다.

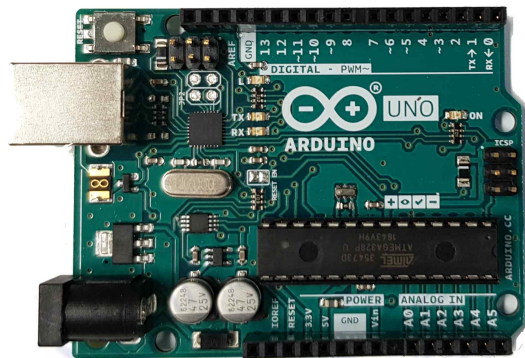


Fig. 2.8 Microcontroller(Arduino Uno)

Table 2.6 Arduino Uno specifications

Items		Feature
Microcontroller		ATmega328P
Operating Voltage		5 V
Input Voltage	Recommended	7~12 V
	Limit	6~20 V
DC Current	I/O Pin	20 mA
	3.3 V Pin	50 mA
Digital I/O Pins		14(include PWM)
PWM Digital I/O Pins		6
Analog Input Pins		6
Clock Speed		16 MHz
Weight		25 g

GPS 센서는 NMEA 0183 프로토콜(The National Marine Electronics Association 0183 Protocol)에 의해 각종 위치 정보를 수신하여 마이크로컨트롤러로 전달한다. Fig. 2.9는 본 연구에 사용한 GPS 센서이며, Table 2.7은 해당 GPS 센서의 주요 사양을 나타낸다.



Fig. 2.9 GPS sensor(NEO-M8N)

Table 2.7 GPS sensor specifications

Items	Feature
Receiver Type	72-channel u-blox M8 engine
Operating Voltage	3.3 or 5 V
Frequency of time pulse signal	0.25 Hz - 10 MHz
Velocity accuracy	0.05 m/s
Heading accuracy	0.3 degrees
Horizontal position accuracy	2.5 m
Weight	33 g

제 3 장 호송항법시스템

3.1 경로설정 알고리즘

호송항법시스템을 개발하기 위해, 호송선의 경로를 바탕으로 추종선의 경로를 설정하여 침로(Course) 및 항정(Sailing distance)을 계산하는 경로설정 알고리즘을 설계하였다. 경로설정 알고리즘은 보트 정보를 송수신하기 위한 마이크로컴퓨터의 데이터통신 알고리즘과 변침점 설정, 침로 및 항정을 계산하는 마이크로컨트롤러의 침로설정 알고리즘으로 나눌 수 있다.

먼저, 데이터통신 알고리즘은 멀티스레드(Multi thread) 이용하여 보트 내부의 정보 교환을 위한 UART(Universal asynchronous receiver/transmitter) 통신과 다른 보트와의 정보 교환을 위한 TCP/IP 소켓(Transmission control protocol/internet protocol socket) 통신을 병렬로 구성하였고, 프로그래밍(Programming) 언어로 파이썬(Python)을 사용하였다 (Meyer, 2017).

데이터통신 알고리즘의 흐름도를 Fig. 3.1에 나타낸다. UART 통신은 직렬 포트(Serial port)를 통해 장치를 연결하고 데이터 전송 속도(Baud rate)를 일치시킨 후 해당 포트를 열면 데이터 전송 준비가 완료되며, TCP/IP 통신은 서버(Server)가 소켓을 생성하고 연결을 기다리는 것으로 시작한다. 여기서 클라이언트(Client)가 서버에 연결을 요청하면, 접속 요청을 받은 서버는 클라이언트의 연결을 수락하고, 클라이언트에 연결을 요청한다. 클라이언트가 서버의 연결을 수락하면 클라이언트와 서버는 연결이 되며, 데이터를 전송할 수 있는 상태가 된다.

마이크로컴퓨터가 직렬 통신과 TCP/IP 통신에 연결되어 데이터 전송 준비가 완료되면, 호송선은 직렬 통신을 통해 마이크로컨트롤러로부터 보트의 위치 정보를 수신하고 수신한 정보는 TCP/IP 통신을 통해 추종선으로 송신된다. 추종선은 TCP/IP 통신을 통해 보트의 위치 정보를 호송선으로부터 수신하고, 수신한 정보는 직렬 통신을 통해 마이크로컨트롤러로 송신된다.

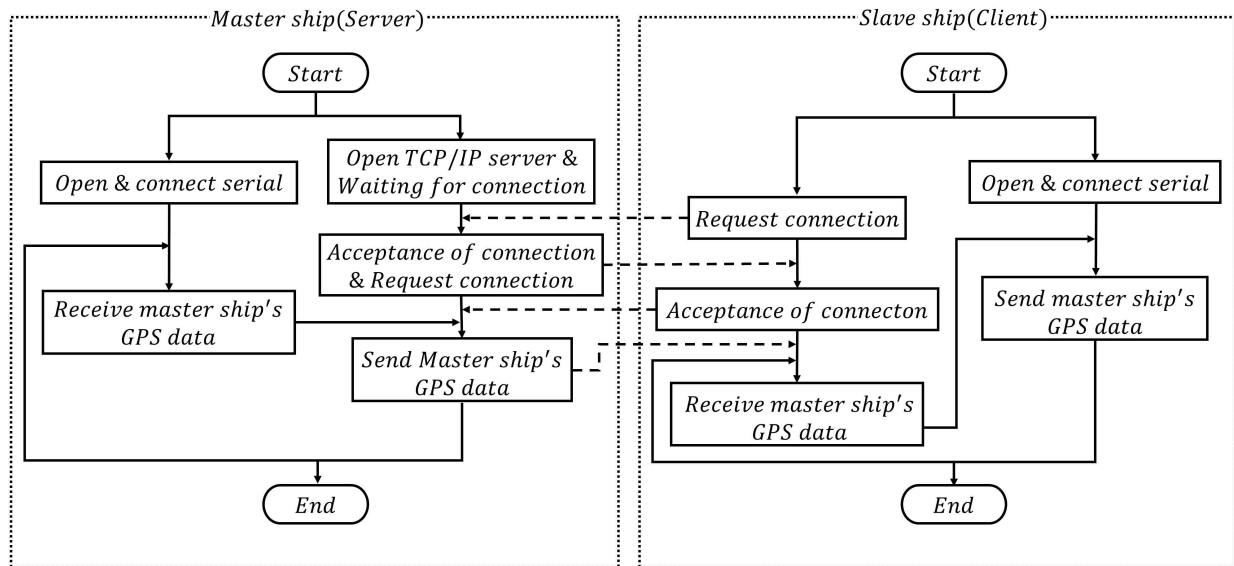


Fig. 3.1 Data communication algorithm flowchart(microcomputer)

침로설정 알고리즘은 마이크로컴퓨터와 정보 교환을 위한 UART 통신 기능과 경로 및 침로를 계산하는 기능이 병렬로 구성되어 있으며 프로그래밍 언어로 아두이노의 통합 개발 환경(Integrated development environment)인 스케치(Sketch)를 사용하였다.

침로설정 알고리즘 흐름도를 Fig. 3.2에 나타낸다. 호송선은 수신한 GPS 정보를 파싱(Parsing)하여 경도, 위도, 대지속력(Speed over ground), 대지침로(Course over ground) 등의 위치 정보를 추출하여 직렬 통신을 통해 마이크로컴퓨터로 전송한다. 그리고 RF 수신기로부터의 신호가 없으면 미리 설정된 변침점을 따라 자동으로 항해하기 위해 침로 및 항정을 계산한다. 추종선은 변침점을 설정하고 침로 및 항정 계산을 수행한다. 변침점의 설정은 시리얼 통신을 통해 수신한 호송선의 경도 및 위도 정보를 저장하는 순서로 진행되고 침로 및 항정은 GPS 센서를 통해 수집한 자선의 위치 정보와 저장된 변침점을 통해 계산된다. 자선과 변침점 사이의 거리가 5 m 이하이면, 변침점을 통과한 것으로 간주하여 변침점이 다음 변침점으로 변경된다.

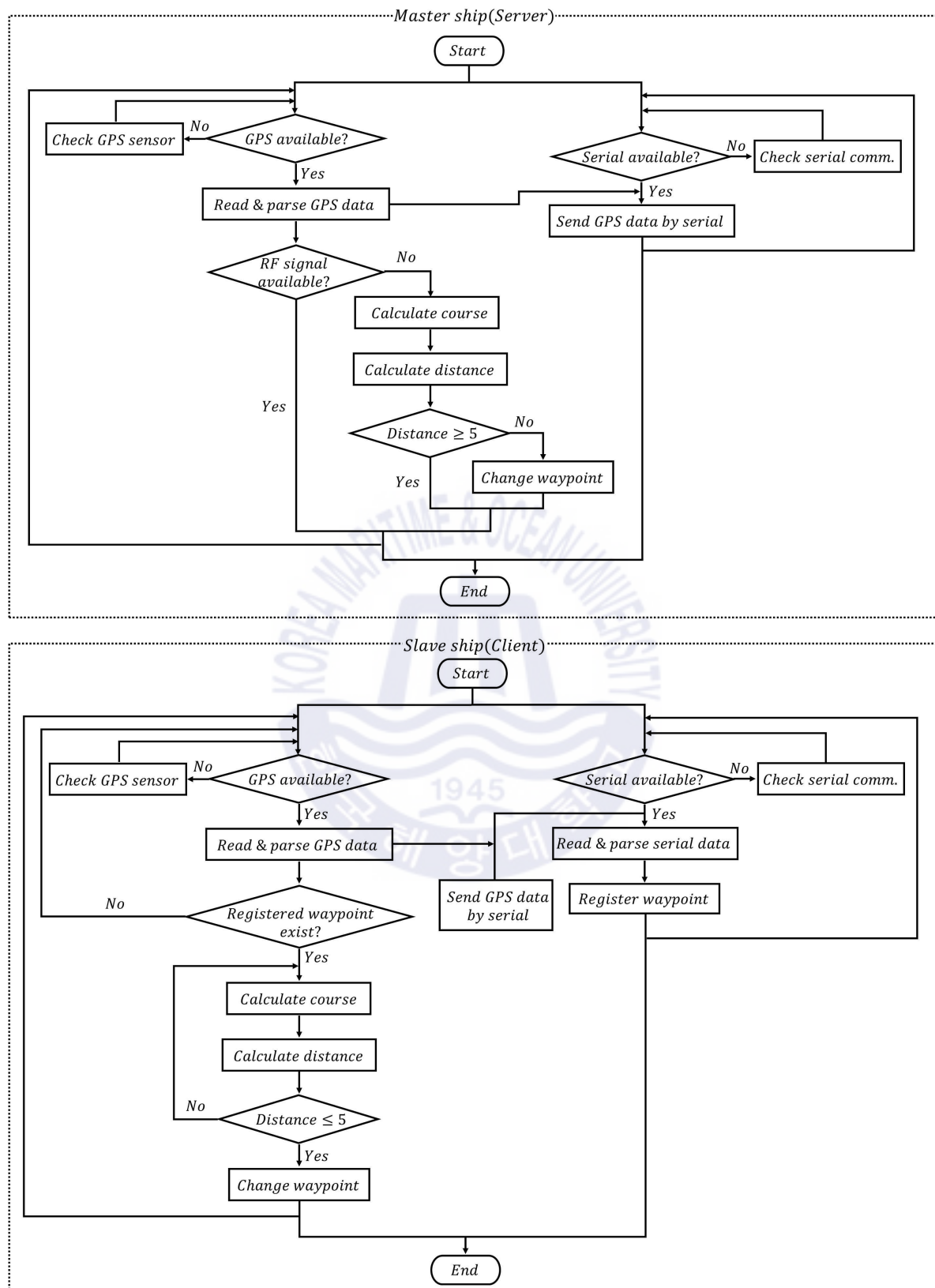


Fig. 3.2 Course setup algorithm flowchart(microcontroller)

변침점까지의 침로 및 항정을 계산하기 위해 사용한 중분위도항법(Middle latitude sailing)은 “두 지점 사이의 동서거(Departure, p)는 두 지점의 평균중분위도(Middle latitude, L_m)에서의 자오선거와 같다” 는 가정 아래 이루어진 항법으로 중분위도(L_m)가 60° 이하, 항정(D)이 600해리 이내일 때 오차가 1% 이하인 것으로 알려져 있다 (윤여정 등, 2013). 여기서 동서거(p)는 두 지점이 같은 위도일 때 그 두 지점의 자오선 사이의 거리, 평균중분위도(L_m)는 두 지점에서 위도의 평균을 의미한다.

Fig. 3.3은 출발지점(A)의 위도 및 경도가 L_1, λ_1 이고, 도착지점(Z)의 위도 및 경도가 L_2, λ_2 일 때, 출발지점(A)과 도착지점(Z)사이의 변경(Difference of longitude, DL_o), 변위(Difference of latitude, l), 동서거(p), 평균중분위도(L_m) 및 침로(C)와 항정(D)을 나타낸 중분위도항법에 대한 개략도이다. 여기서 변경(Difference of longitude, DL_o)은 두 지점을 지나는 자오선 사이의 적도의 호를 의미하고, 변위(Difference of latitude, l)는 두 지점을 지나는 거동권 사이의 자오선의 호를 의미하며, 침로(C)와 항정(D)을 구하기 위한 계산식은 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

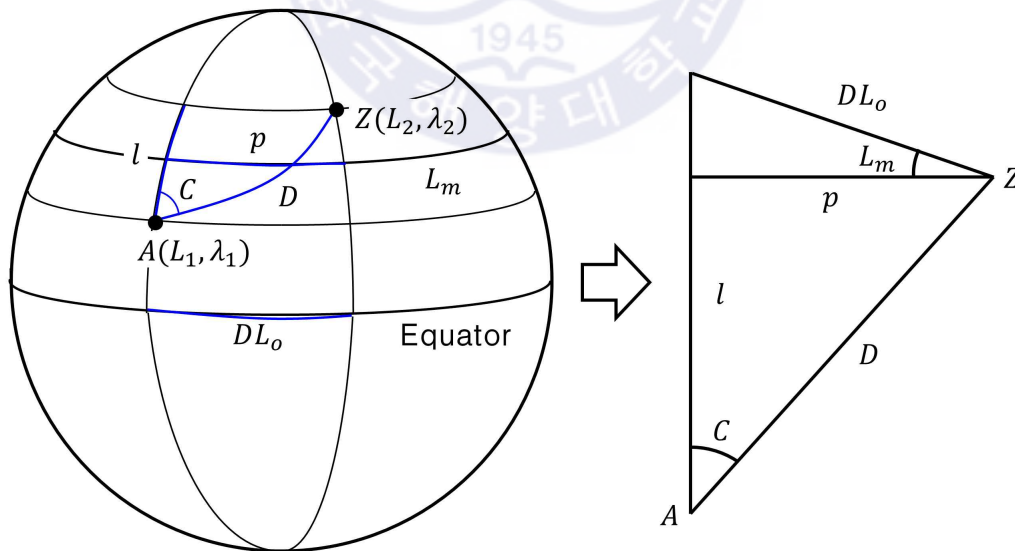


Fig. 3.3 Middle latitude sailing

$$\tan C = \frac{p}{l} = \frac{DL_o \cos L_m}{l} \quad (1)$$

$$D = l \sec C \times 60 \times 1,852 \text{ (m)} \quad (2)$$

$$\text{단, } DL_o = \lambda_2 - \lambda_1$$

$$l = L_2 - L_1$$

$$L_m = (L_1 + L_2)/2$$

$$p = DL_o \cos L_m$$

중분위도항법은 항해거리가 200해리 미만으로 짧은 경우에 사용하는 평면항법(Plane sailing)과 비교하여 계산량은 늘어나지만, 계산된 항정과 침로는 더 정확하다. 두 항법의 비교를 위해 본 연구에서 실험에 사용하기 위해 설정한 변침점과 변침점 사이의 항정 및 침로를 두 항법에 의해 계산한 결과를 Table 3.1에 나타낸다. 설정된 변침점 사이의 간격이 80 m 이내였음에도 두 항법의 침로 사이에는 약 5~6°, 전체 항정에서는 약 34 m의 차이가 발생하였다. 이는 평면항법의 항정이 중분위도항법보다 약 12 % 더 긴 것으로, 그만큼 중분위도항법의 정확도가 더 높은 것을 의미한다.

Table 3.1 Comparison between Plane sailing and Middle latitude sailing

	Latitude	Longitude	Plane sailing		Middle latitude sailing	
			Course	Distance	Course	Distance
Waypoint 1	35.074445 °	129.084722 °				
Waypoint 2	35.075000 °	129.084167 °	315 °	87 m	321 °	80 m
Waypoint 3	35.075277 °	129.084722 °	064 °	69 m	059 °	59 m
Waypoint 4	35.074722 °	129.085278 °	135 °	87 m	141 °	80 m
Waypoint 1	35.074445 °	129.084722 °	244 °	69 m	239 °	59 m

3.2 타각제어 알고리즘

보트가 타각을 스스로 명령하여 목표침로를 추종하고 설정된 변침점을 찾아가기 위한 타각제어 알고리즘을 설계하였다. 먼저, 두 대의 실험보트에 대한 선박조종운동 방정식을 추정하였고, 추정된 방정식을 기반으로 보트의 조종성능에 적합한 PD 제어를 설계하였다.

3.2.1 선박조종운동 방정식

선박이 강체라고 가정하면, 선박의 조종운동방정식은 6자유도 운동에 의해 표현된다. 이는 유체력의 관점에서 선박의 조종운동을 나타낸 모형으로, 실험선박에 적용하여 조종운동을 표현하기에는 무리가 있다.

따라서 선박의 조종운동을 유체력의 관점이 아닌 타각의 변화에 대한 선회 각속도의 관계로 표현한 Nomoto 응답 모델을 채택하였다. Nomoto는 타각(δ), 선회각속도(r)와 조종성지수(T_1, T_2, T_3, K)로 표현되는 모델을 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (3)$$

식 (3)에서 $T = T_1 + T_2 - T_3$ 이라고 하면, Nomoto 응답 모델은 식 (4)와 같이 1계 미분방정식형태인 Nomoto 1차 모델로 표현할 수 있다 (Fossen, 1994).

$$T \dot{r} + r = K\delta \quad (4)$$

이를 전달함수로 표현하면 식 (5)와 같으며, 이는 입력(타각)에 따른 출력(선회각속도)을 표현할 수 있다는 점에서 선박의 조종운동 특성을 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다.

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{1 + Ts} \quad (5)$$

그러나 실험보트의 경우 조종성지수 K 와 T 를 알 수 없고, 연속시간이 아닌 이산시간 시스템인 관계로 ARX(Autoregressive with Exogenous Variables) 모델을 적용하여 식 (5)의 전달함수를 추정하였다. ARX 모델은 입력값에 대한 출력값을 자기 회귀를 통해 추정하는 모형을 의미하며 (Ljung, 1987), 본 연구에서 사용된 이산시간 ARX 모델은 입력인 타각(δ), 출력인 선회각속도(r)와 백색 잡음(White noise disturbance, e)에 대하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(z)r(k) = B(z)\delta(k) + e(k) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } A(z) &= 1 + a_1 z^{-1} \\ B(z) &= b_1 + b_2 z^{-1} \end{aligned}$$

ARX 모델의 파라미터 a_1 , b_1 , b_2 는 입출력 데이터인 타각(δ)과 선회각속도(r_m)를 분석하여 추정할 수 있다. 이에 두 실험보트의 선회시험을 시행하여 실험보트의 타각(δ)과 GPS 센서로부터 계산된 선회각속도(r_m) 데이터를 획득하였다. 실험 중 호송선과 추종선의 모터 펄스 폭은 각각 $1560 \mu s$ 와 $1690 \mu s$ 로 일정하게 유지하였고, 약 6.8 kn(3.5 m/s)와 7.0 kn(3.6 m/s)의 속력을 평균적으로 유지하였다. Fig. 3.4는 실험 장소인 한국해양대학교 인근 해상을 나타낸 Google Earth 지도이며, 호송선과 추종선의 선회시험 항적을 Fig. 3.5 및 Fig. 3.6에 나타낸다.

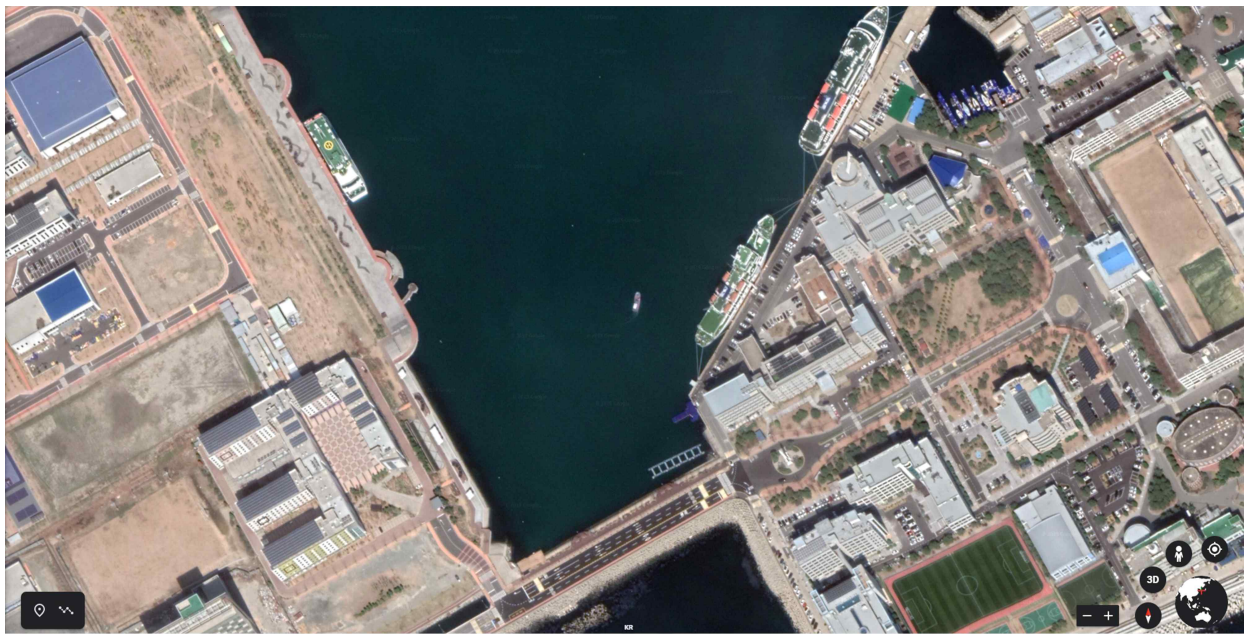


Fig. 3.4 Sea test site

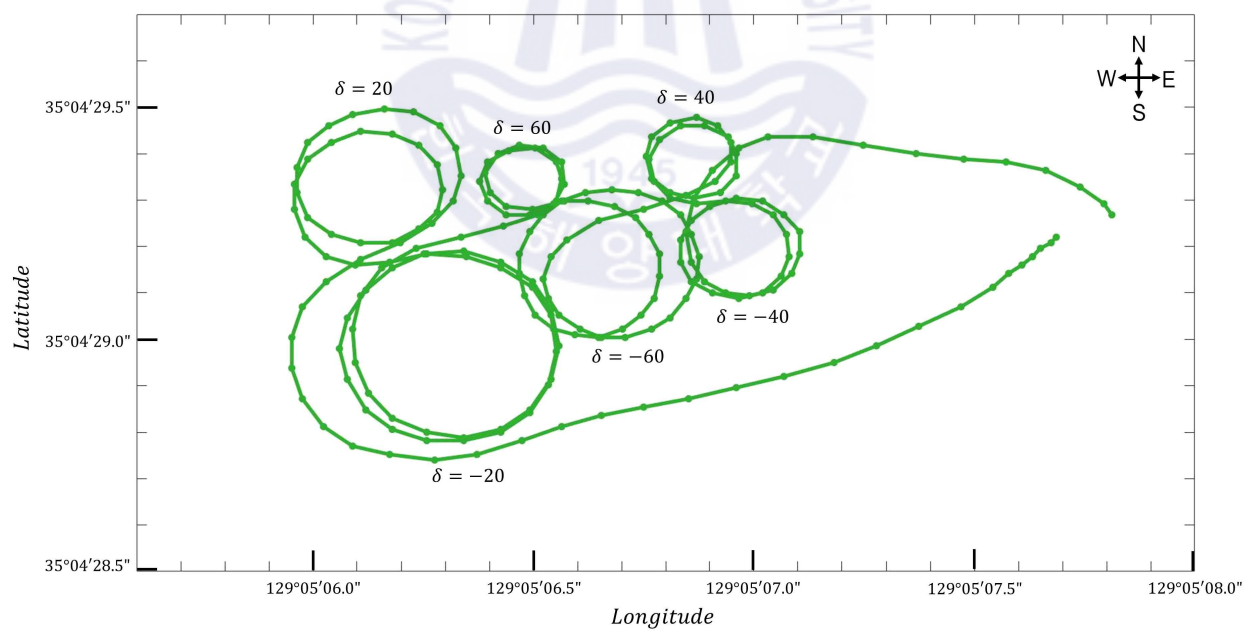


Fig. 3.5 Master ship trajectory on turning test

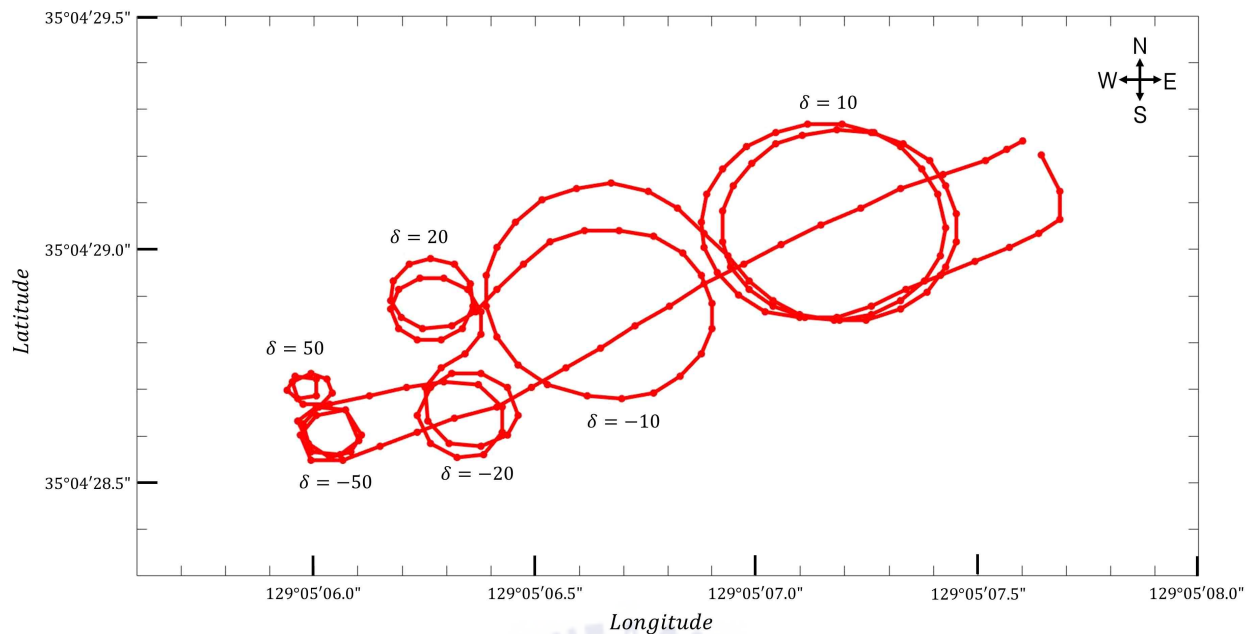


Fig. 3.6 Slave ship trajectory on turning test

선회시험 중 호송선과 추종선의 시간에 따른 타각(δ) 및 선회각속도(r_m)를 Fig. 3.7 및 Fig. 3.8에 나타낸다. 선회시험결과 두 실험선박의 선회각속도 값에 헌팅(Hunting)이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 크기가 1m 내외로 작은 실험보트가 실험 중 개방된 해상에서 외부환경요인의 영향을 많이 받아 나타나는 현상으로 여겨진다. 그리고 두 실험선박의 최대 타각은 60° 로 설정되어 있지만, 타각을 40° 이상 사용한 경우 실속현상(Stalling)이 발생하여 (Rawson & Tupper, 2001) 효율이 없는 것으로 나타났다.

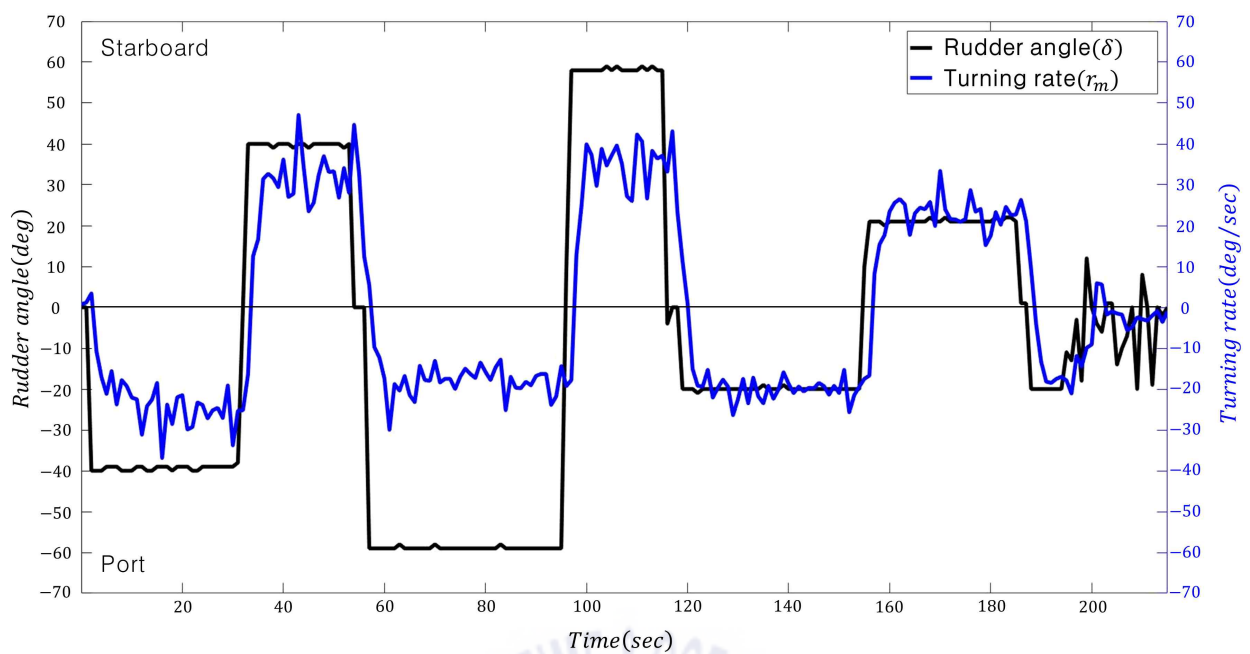


Fig. 3.7 Rudder angle and turning rate of master ship on turning test

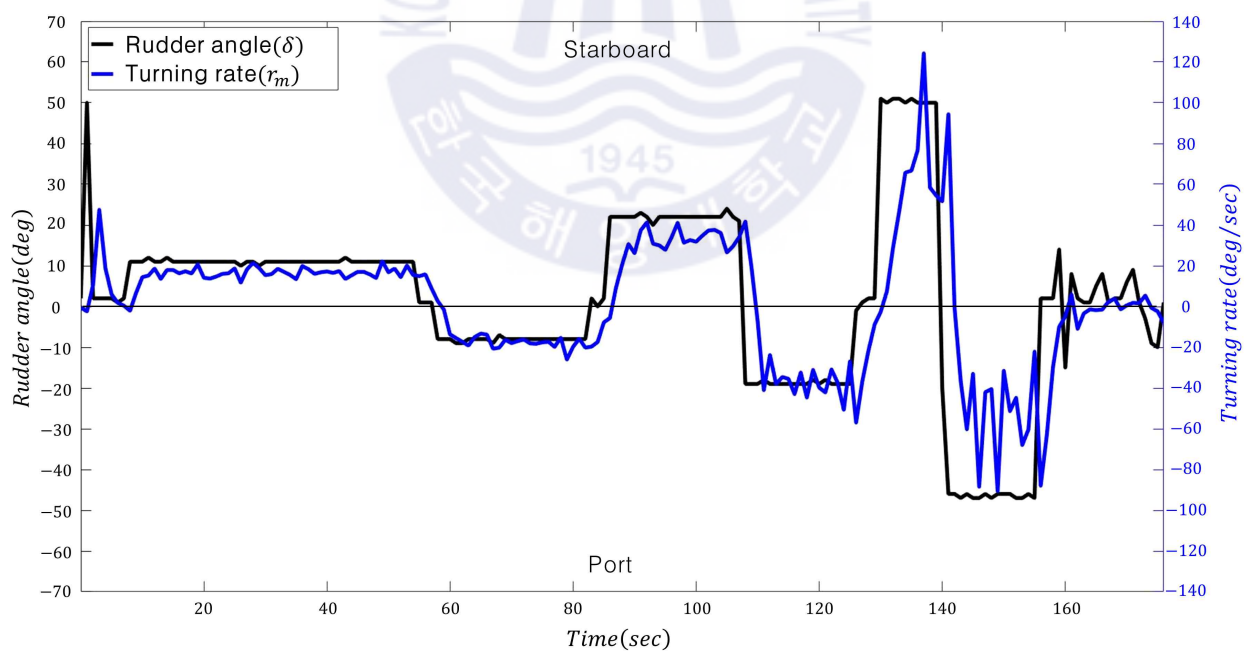


Fig. 3.8 Rudder angle and turning rate of slave ship on turning test

파라미터 추정에는 실제값(r_m)과 추정값(r)의 오차 제곱의 합이 최소가 되는 최소자승법(Least-squares method)이 사용된 MATLAB의 시스템 식별 툴박스(System identification toolbox)를 이용하였다. 이로부터 ARX 모델의 파라미터를 구하였으며, 호송선과 추종선의 ARX 모델은 각각 식 (7), (8)과 같다.

$$(1 - 0.5977z^{-1})r(k) = (0.03551 + 0.3495z^{-1})\delta(k) + e(k) \quad (7)$$

$$(1 - 0.6168z^{-1})r(k) = (-0.002571 + 0.6519z^{-1})\delta(k) + e(k) \quad (8)$$

ARX 모델의 유효성을 검증하기 위해, 호송선과 추종선의 선회시험을 같은 장소에서 재시행하였다. 실험 중 호송선과 추종선의 모터 펄스 폭은 각각 $1560 \mu s$ 와 $1670 \mu s$ 로 일정하게 유지하였고, 약 $6.4 \text{ kn}(3.3 \text{ m/s})$ 와 $8.4 \text{ kn}(4.3 \text{ m/s})$ 의 속력을 평균적으로 유지하였다. 획득한 타각(δ) 데이터를 통해 ARX 모델의 선회각속도(r)를 계산하였고, 이를 실제 선회각속도(r_m)와 비교하여 Fig. 3.9 및 Fig. 3.10에 나타낸다.

호송선 실험결과, ARX 모델의 선회각속도(r_m)와 실제 선회각속도(r)의 오차가 평균적으로 약 8 deg/sec 인 것으로 나타났으나 좌현타 40° 로 선회하는 $5 \sim 45$ 초 구간에서는 평균 18 deg/sec 의 오차가 발생하였다. 이는 실속현상으로 인한 것으로 타가 오른 쪽으로 치우쳐 설치되어있는 구조상의 한계 때문에 좌현타를 사용하는 경우 더 작은 각도에서 나타나는 것으로 여겨진다. 추종선의 경우 ARX 모델의 선회각속도(r_m)와 실제 선회각속도(r)의 오차가 평균적으로 약 9 deg/sec 인 것으로 나타났으나 대각도 타각(30°)을 사용하는 $80 \sim 105$ 초 구간에서는 최대 61 deg/sec 의 오차가 발생하였다. 이는 대각도 타각 사용 시 헛팅이 많이 발생하여 나타난 오차인 것으로 여겨진다.

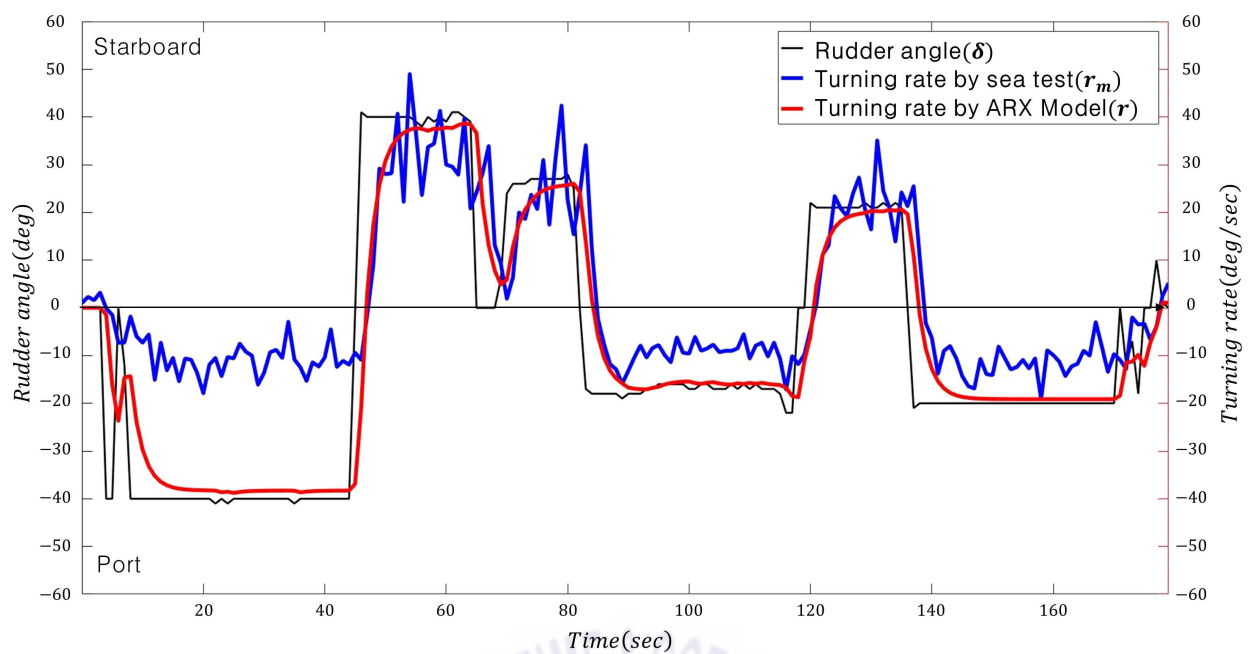


Fig. 3.9 Turning rate by sea test(r_m) and ARX model(r) of master ship

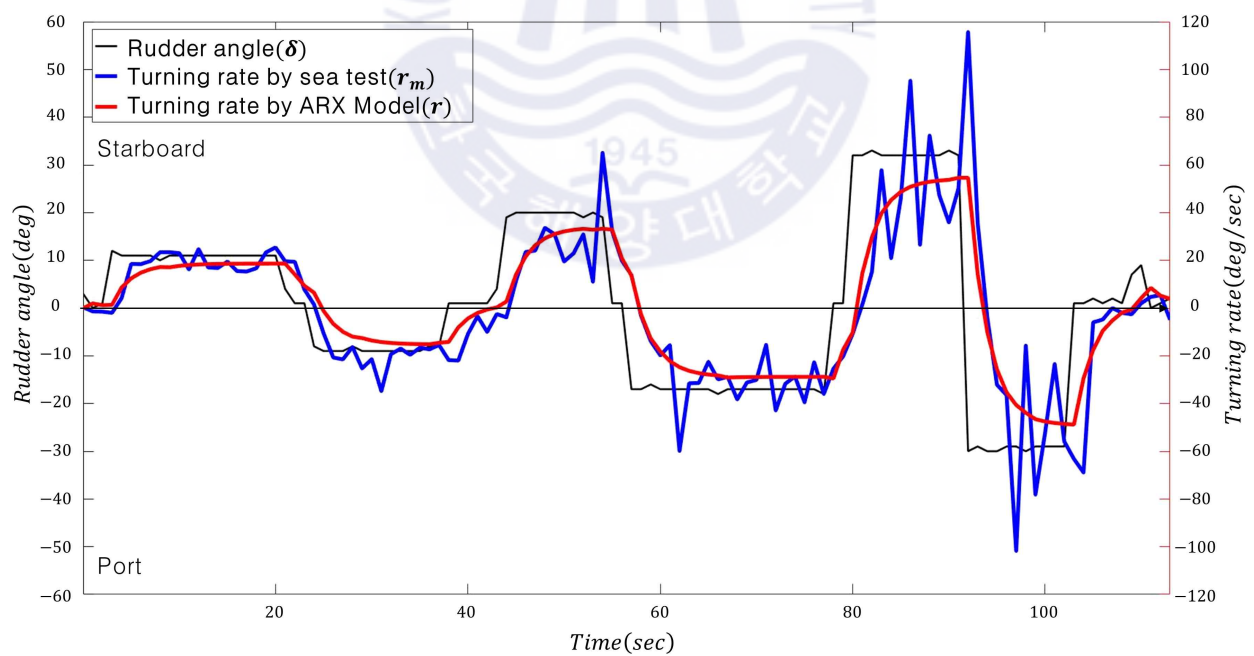


Fig. 3.10 Turning rate by sea test(r_m) and ARX model(r) of slave ship

3.2.2 디지털 제어기 설계

일반적으로 선박은 PD 또는 적분동작이 추가된 PID 제어기를 자동조타장치에 사용하고 있으나, PID 제어기는 포화기(Saturator)에 의한 적분동작(Integral action)의 와인드업(Windup) 현상을 방지하기 위한 안티와인드업(Anti-windup) 기법 (Åström & Hägglund, 1995)을 적용해야 하는 등 PD 제어기와 비교하여 설계가 복잡하며 고급이다. 그러나 이철영 등 (1985)의 연구에 따르면 PD 제어기가 PID 제어기보다 시정수(Time constant)는 크지만, 오버슈트(Overshoot)가 작고 정정시간(Settling time)이 짧아 안정성이나 응답특성면에서 우수한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 실험보트의 선박조종운동 방정식인 ARX 모델을 기반으로 타각제어를 위한 디지털 PD 제어기를 설계하였다.

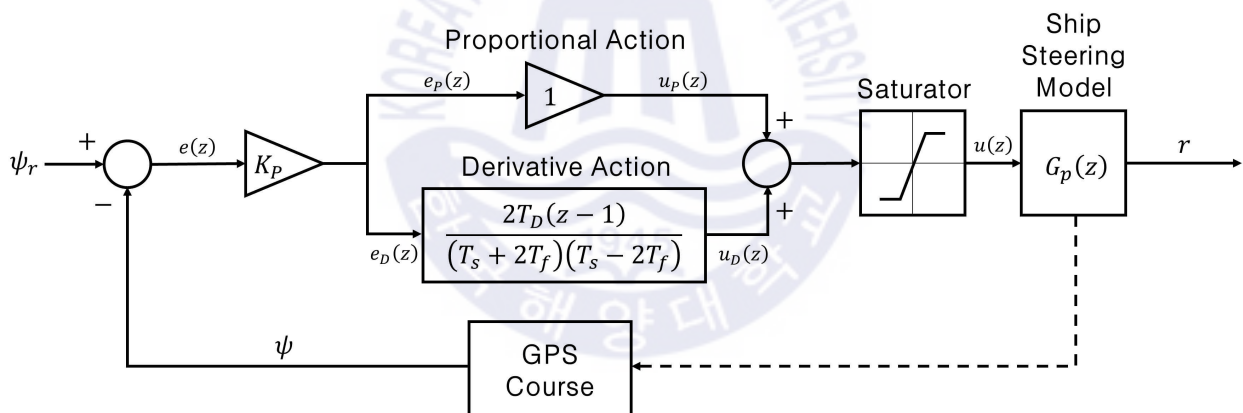


Fig. 3.11 Digital PD controller block diagram

여기서 K_P 는 비례이득(Proportional gain), T_D 는 미분시간(Derivative time), T_f 는 미분시정수(Derivative time constant), 그리고 T_s 는 샘플링시간(Sampling time)이다. 본 연구에서 설계한 디지털 PD 제어기는 목표침로(ψ_r)가 입력되면 현재침로(ψ)와 비교하여 그 차이가 PD 제어기로 입력된다. PD 제어기에서는 비례동작(Proportional action)과 미분동작(Derivative action)이 일어나고, 포화기에 의해 출력이 제한되어 선박조종운동 방정식으로 입력된다. 선박조종운동 방정식은 입력된 타각(δ)에 대한 선회각속도

(r)를 출력하며, 현재침로(ψ)를 변화시킨다. 한편, 일반적인 미분동작은 고주파 잡음에 의해 의도치 않은 큰 출력이 발생하는 미분폭주(Derivative kick) 현상이 발생할 수 있으므로, 1차 저역필터(Low pass filter)를 적용한 식 (9)를 디지털 PD 제어기에 적용하였다. 여기서 N 은 필터의 대역폭을 조절하는 계수로써, 보통 8에서 20 사이의 값을 가지며 (Åström & Hägglund, 1995), 본 연구에서는 N 의 값을 10으로 정하였다.

$$\frac{2T_D(z-1)}{(T_s+2T_f)(T_s-2T_f)} \quad (9)$$

$$\text{단, } T_f = \frac{T_D}{N}$$

그리고, 디지털 PD 제어기의 파라미터인 비례이득(K_p)과 미분시간(T_D)은 동조(Tuning)를 통해 최적의 값을 찾는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 릴레이 피드백 동조법(Relay feedback tuning method)을 이용하여 제어기의 파라미터를 결정하였다 (Åström & Hägglund, 1984). 릴레이 피드백 동조법은 Fig. 3.12와 같이 릴레이(Relay)를 폐회로에 추가하여 출력을 강제로 진동시켜서 한계 진동(Critical oscillation)이 발생할 때의 한계이득(Critical gain, K_c)과 한계주기(Critical period, T_c)를 결정하는 방법이다.

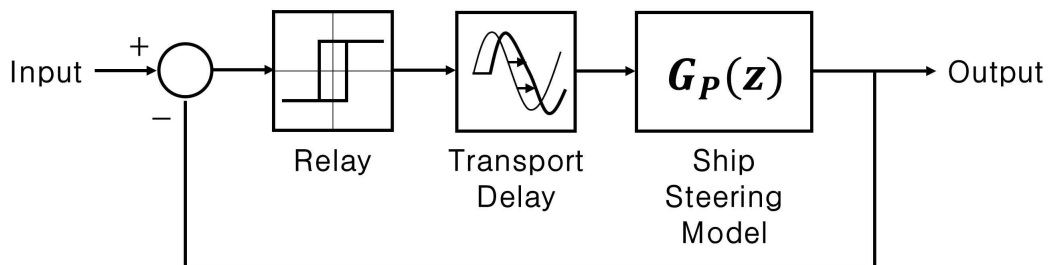


Fig. 3.12 Relay feedback tuning method block diagram

호송선과 추종선의 선박운동방정식에 진폭(d)이 10인 릴레이와 1초의 시간지연 (Transport delay)을 추가하면 Fig. 3.13 및 Fig. 3.14와 같은 한계진동이 발생한다.

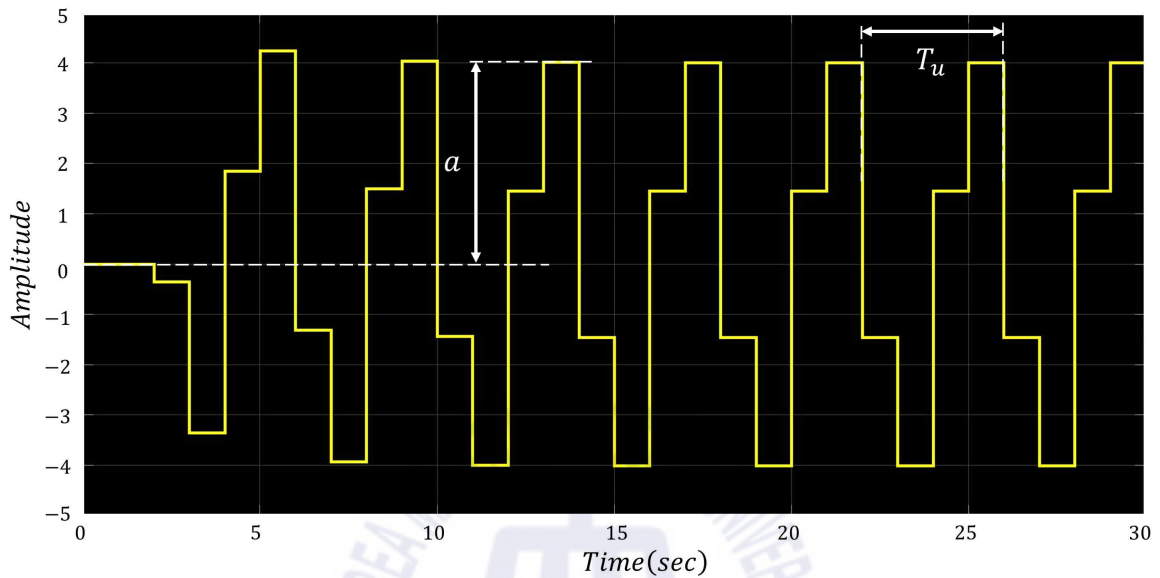


Fig. 3.13 Critical oscillation graph(master ship)

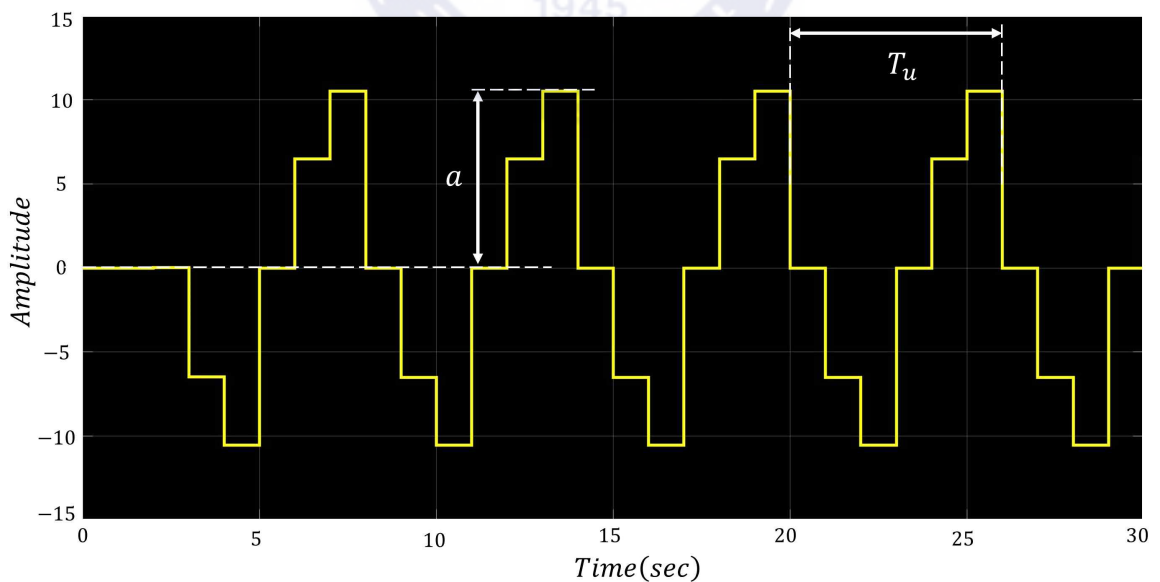


Fig. 3.14 Critical oscillation graph(slave ship)

호송선과 추종선의 한계주기(T_c)는 각각 4초와 6초이고, 한계진동의 진폭(a)은 각각 4.01과 12.65로 나타난다. 그리고 한계이득(K_c)은 식 (10)에 의해 계산된다.

$$K_c = \frac{4d}{\pi a} \quad (10)$$

여기서 릴레이의 진폭(d)은 앞서 설정한 값인 10이며, 호송선과 추종선의 한계이득(K_c)은 각각 3.18과 1.01로 계산된다. 두 보트의 한계주기(T_c)와 한계이득(K_c)이 결정되면, PD 제어기의 계수를 설정한다. Ziegler-Nichols에 따른 PD 제어기의 파라미터 계산법(Ziegler & Nichols, 1942)은 오버슈트(Overshoot)가 과도하게 발생하여 선박의 조타 제어에 적합하지 않아 수정된 방법인 No-overshoot 방법(McCormack & Godfrey, 1998)에 따라 PD 제어기의 파라미터를 계산하였다. 이 파라미터를 이용하여 해상 검증을 하였으나 침로추종이 제대로 이루어지지 않아, 수차례 반복 실험을 통해 적절한 파라미터 값을 찾아내었고, 이를 Table 3.2에 정리하여 나타낸다.

Table 3.2 PD controller parameters

	K_c	T_c	No-overshoot		Fine-tuned	
			$K_P = 0.2K_c$	$T_D = T_u/3$	K_P	T_D
Master ship	3.18	4	0.635	1.33	0.458	2
Slave ship	1.01	6	0.201	2	0.302	2

3.2.3 알고리즘 검증

앞에서 구현한 조타 제어 알고리즘을 검증하기 위해 실험보트에 탑재하여 해상실험을 시행하였다. 해상실험은 선회시험이 수행된 장소에서 Table 3.3과 같이 미리 4개의 변침점을 설정하여 보트에 입력하고 조타 제어 알고리즘을 통해 설정된 변침점을 추종하는지 확인하는 방식으로 진행되었다. 실험 중 호송선과 추종선의 모터 펄스 폭은 각각 $1560\ \mu\text{s}$ 와 $1680\ \mu\text{s}$ 로 일정하게 유지하였고, 약 $7.0\ \text{kn}(3.6\ \text{m/s})$ 와 $7.8\ \text{kn}(4.0\ \text{m/s})$ 의 속력을 평균적으로 유지하였다.

Table 3.3 Predetermined waypoints

	Latitude	Longitude	Course	Distance
Waypoint 1	35.074445°	129.084722°	321°	80 m
Waypoint 2	35.075000°	129.084167°		
Waypoint 3	35.075277°	129.084722°	059°	59 m
Waypoint 4	35.074722°	129.085278°	141°	80 m

Fig. 3.15 및 Fig. 3.16, Fig. 3.17 및 Fig 3.18은 각각 호송선과 추종선의 경로 및 시간에 따른 타각을 나타낸 그래프이다. 파도와 바람 등 외란으로 인해 이로(Deviation)가 발생하였으나 설정된 변침점을 정상적으로 추종하여 항해하였고, 각 변침점에서 우현으로 변침하기 위해 타를 우현으로 많이 사용한 것을 알 수 있다.



Fig. 3.15 Master ship trajectory during rudder control algorithm test

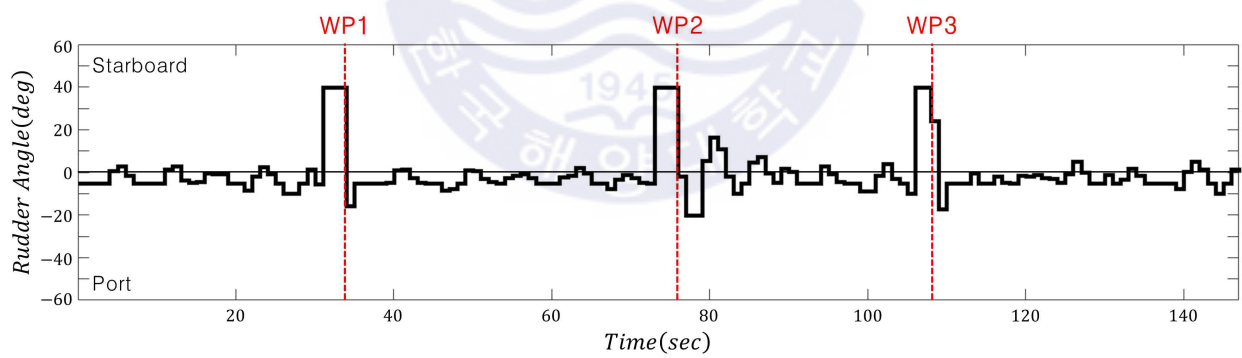


Fig. 3.16 Master ship rudder angle during rudder control algorithm test

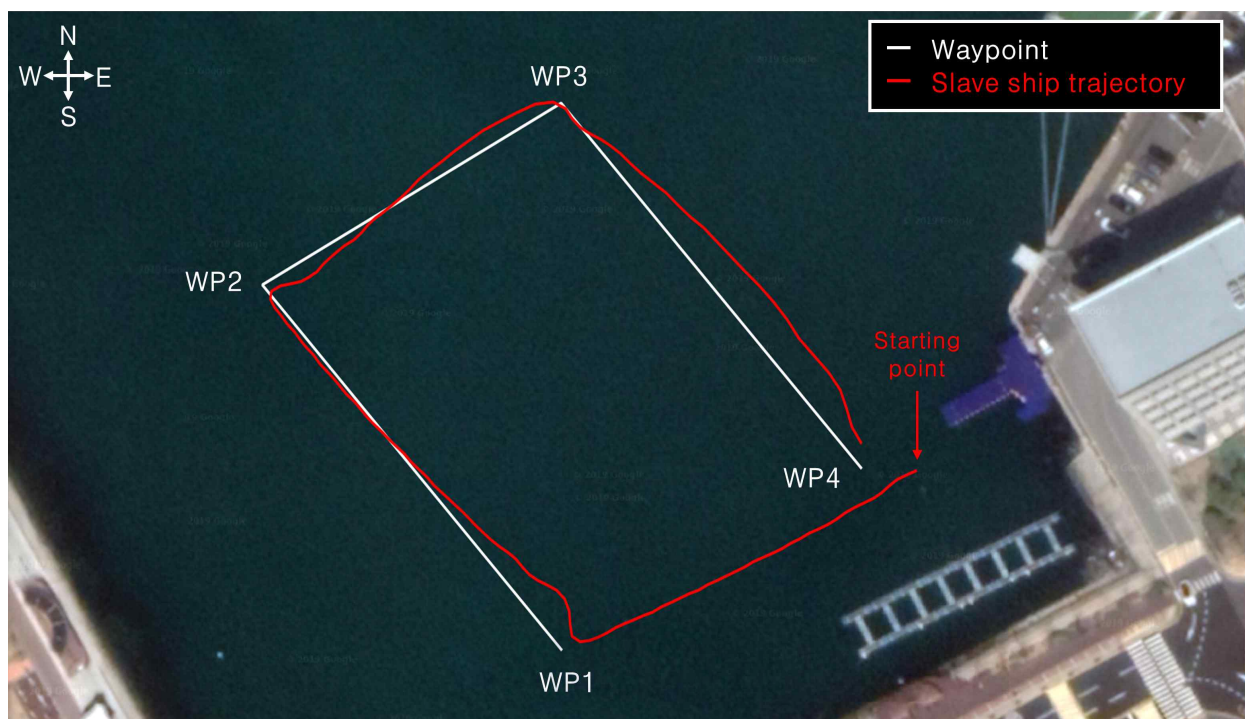


Fig. 3.17 Slave ship trajectory during rudder control algorithm test

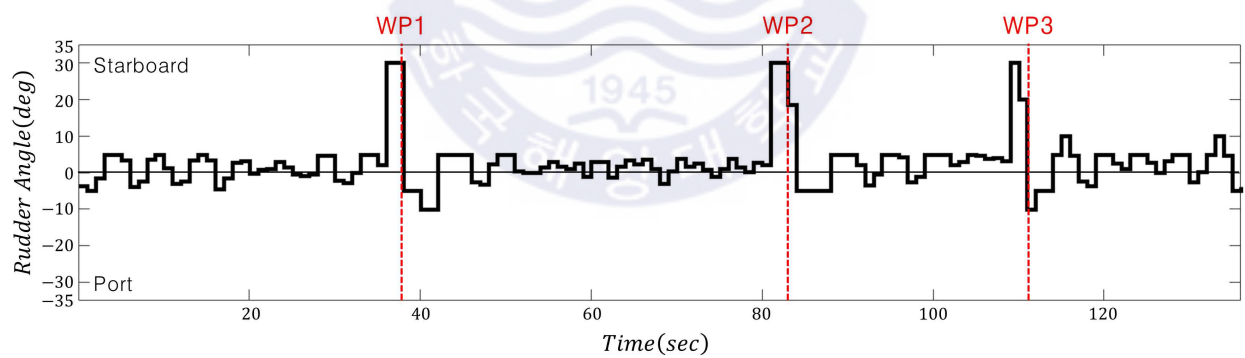


Fig. 3.18 Slave ship rudder angle during rudder control algorithm test

3.3 속도 제어 알고리즘

실험에 사용된 RC모형보트는 모터의 분당회전수를 일정하게 유지하여도 파도, 변침, 바람 등에 의해 프로펠러 공회전(Propeller racing)이 발생하기 쉬워 속력을 일정하게 유지하기 힘들다. 특히 호송선은 추종선에 비해 크기가 작아 파도의 영향을 많이 받으며, 이에 따른 속력의 변화로 두 선박 사이의 거리를 유지하는 것에 어려움이 따른다. 따라서 Fig. 3.19와 같이 추종선의 속력을 제어하기 위한 알고리즘을 설계하였다.

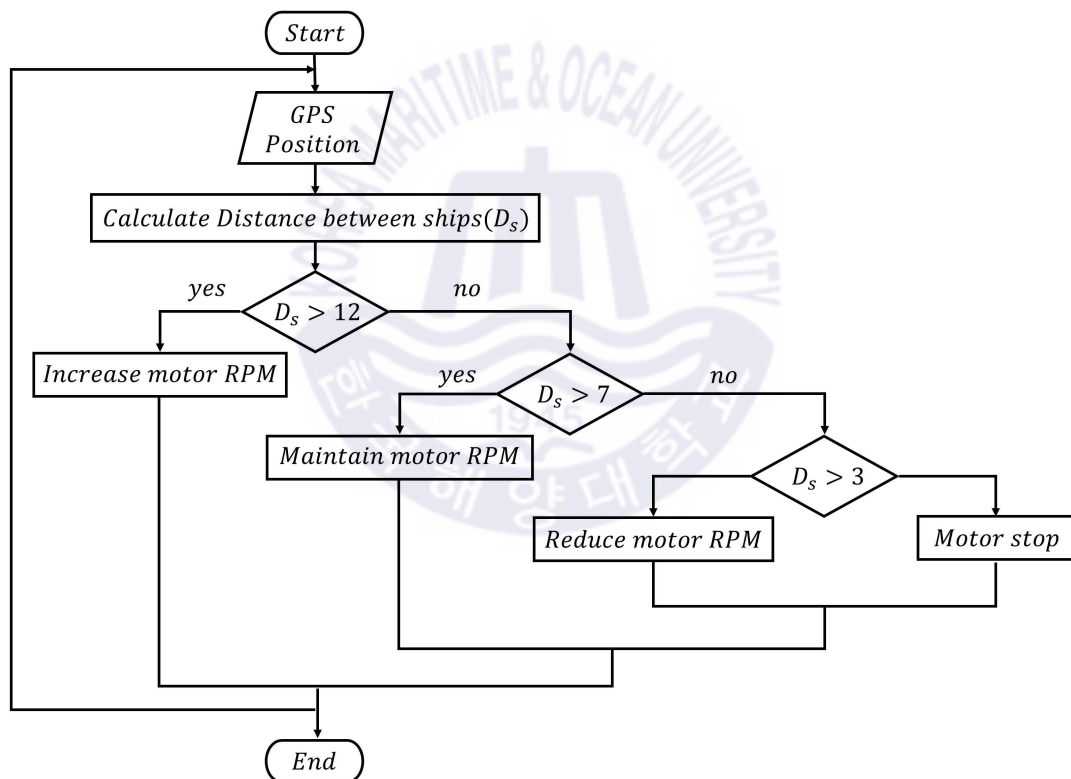


Fig. 3.19 Speed control algorithm flowchart

추종선의 속도제어 알고리즘은 호송선과 자선의 실시간 경도 및 위도 정보를 입력으로 받아 두 보트 사이의 거리(D_s)를 계산하며, 거리(D_s)에 따라 모터로 입력되는 펄스 폭을 조절하여 추종선의 속력을 변화시킨다. 보트 사이의 거리(D_s)가 7 m 이상 12

m 이하이면 속력을 유지하기 위해 펄스 폭이 $1,650\ \mu\text{s}$ 인 신호를 입력하고, 12 m 이상이면 속력을 증가시키기 위해 펄스 폭이 $1,680\ \mu\text{s}$ 인 신호를 입력하며, 3 m 이상 7 m 이하이면 속력을 감소시키기 위해 펄스 폭이 $1,600\ \mu\text{s}$ 인 신호를 입력한다. 마지막으로 보트 사이의 거리(D_s)가 3 m 이하이면 충돌을 방지하기 위해 펄스 폭이 $1,500\ \mu\text{s}$ 인 신호를 입력하여 모터를 정지시킨다. 한편, 보트 사이의 거리(D_s)를 7~12 m로 유지하도록 설계한 것은 실험보트의 길이, 속력 및 무선 통신의 범위를 고려하였기 때문이다.



제 4 장 실험 및 결과

지금까지 설계한 경로설정 알고리즘, 타각제어 알고리즘 및 속력제어 알고리즘을 통합하여 호송항법시스템을 개발하였고, 실험보트에 탑재하였다. 그리고 개발된 호송항법시스템을 검증하기 위하여 두 대의 실험보트를 이용한 해상실험을 시행하였다. 실험은 2019년 9월 4일 수요일 오후 선회시험이 진행된 해상과 같은 장소에서 진행되었다.

(1) 해상실험 1

첫 번째 해상실험은 호송선이 출발점에서 시작하여 미리 설정된 변침점을 따라 시계방향으로 자동항해하면, 추종선이 호송선의 경로를 올바르게 추종하는지 검증하기 위하여 수행되었다. 호송선의 출발점과 미리 설정된 변침점은 Table 4.1와 같다.

Table 4.1 Starting point and waypoints of master ship

	Latitude	Longitude	Course	Distance
Starting point	35.074753 °	129.085420 °	242 °	72 m
Waypoint 1	35.074445 °	129.084722 °		
Waypoint 2	35.075000 °	129.084167 °	321 °	80 m
Waypoint 3	35.075277 °	129.084722 °	059 °	59 m
Waypoint 4	35.074722 °	129.085278 °	141 °	80 m

Fig. 4.1은 첫 번째 해상실험 동안 수집한 보트의 데이터의 일부를 나타낸 것이다. 저장된 데이터는 선박 식별 문자, 데이터 식별 문자, 시간, 경도, 위도, 대지속력, 대지침로, 서보모터 펄스 폭, 모터 펄스 폭 등 9개로 구성되며, 쉼표(,)로 구분하였다.

** Data format*

Vessel ID, Data ID, Time, Latitude, Longitude, SOG, COG, Servo motor pulse width, Motor pulse width

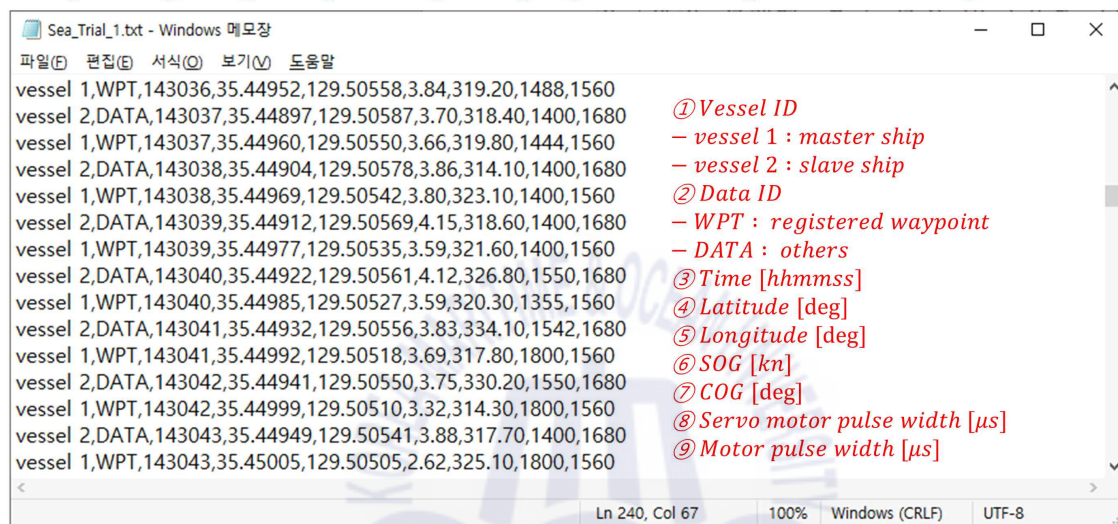


Fig. 4.1 Log data at the first sea trial

Fig. 4.2는 두 보트의 항적을 변침점과 함께 나타낸 것이다. 그래프의 검은색 선은 변침점을 연결한 경로를 나타낸 것이며, 초록색과 빨간색 선으로 각각 호송선의 항적과 추종선의 항적을 의미한다. 그리고 그래프에 표시된 시간은 보트가 해당 위치를 지날 때의 시각을 나타낸다. 호송선은 변침점을 지날 때 약간의 이로가 발생하였으나 설정된 변침점을 따라 자동항해하였고, 추종선은 본 연구에서 구현된 호송항법시스템에 의해 호송선의 항로를 일정 거리를 두고 자동으로 추종하였다.

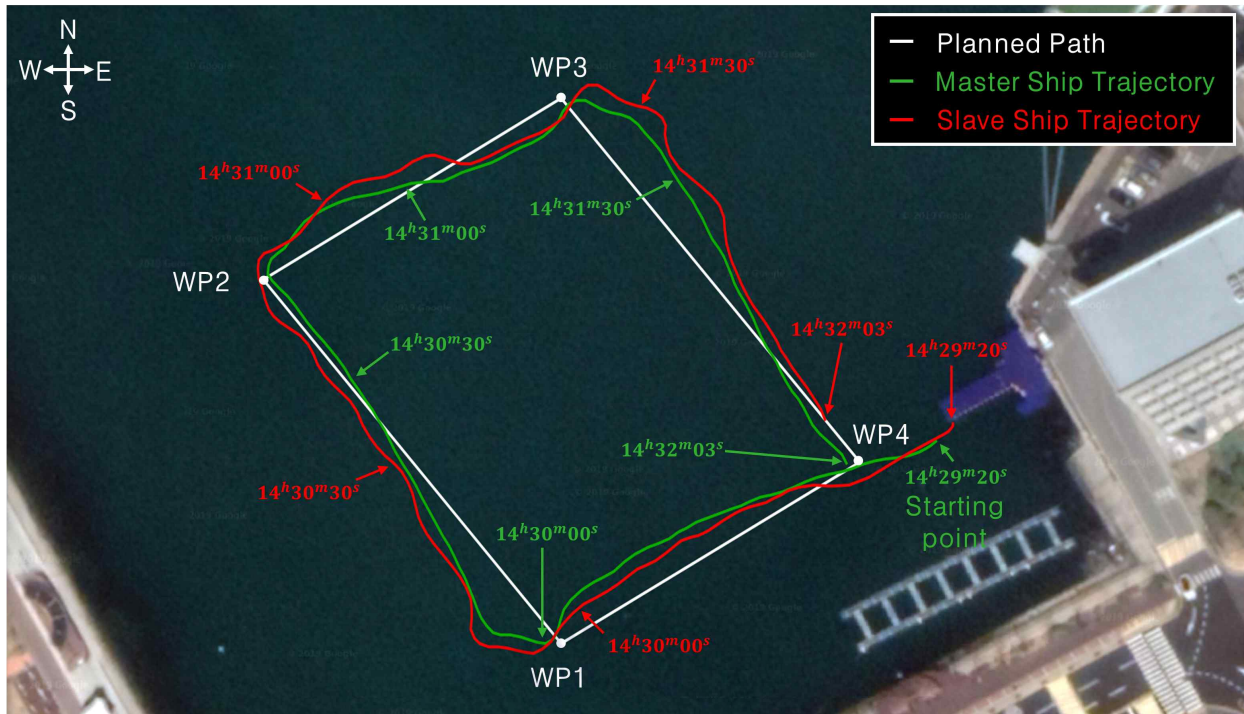


Fig. 4.2 Master and slave ships trajectories during the first sea trial

Fig. 4.3 및 Fig. 4.4는 첫 번째 해상실험 동안 호송선과 추종선의 타각 및 모터의 펄스 폭을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 두 실험선박은 경량이기 때문에 파도나 바람 등 외부 영향을 많이 받아 침로를 유지하기 위해 지속적으로 타를 사용하였다. 호송선은 각 변침점에서 우현으로 변침하기 위해 타를 우현으로 대각도 사용하였다가 침로를 유지하기 위해 반대타(좌현타)를 사용하였으며, 항해 중 모터의 펄스 폭을 일정하게 유지하였다. 추종선은 호송선과의 거리를 유지하기 위하여 펄스 폭이 증가 또는 감소하였으며, 모터가 정지하기도 하였다. 호송선과 추종선의 평균 속력은 약 7.0 kn(3.6 m/s)와 7.2 kn(3.7 m/s)로 나타났다.

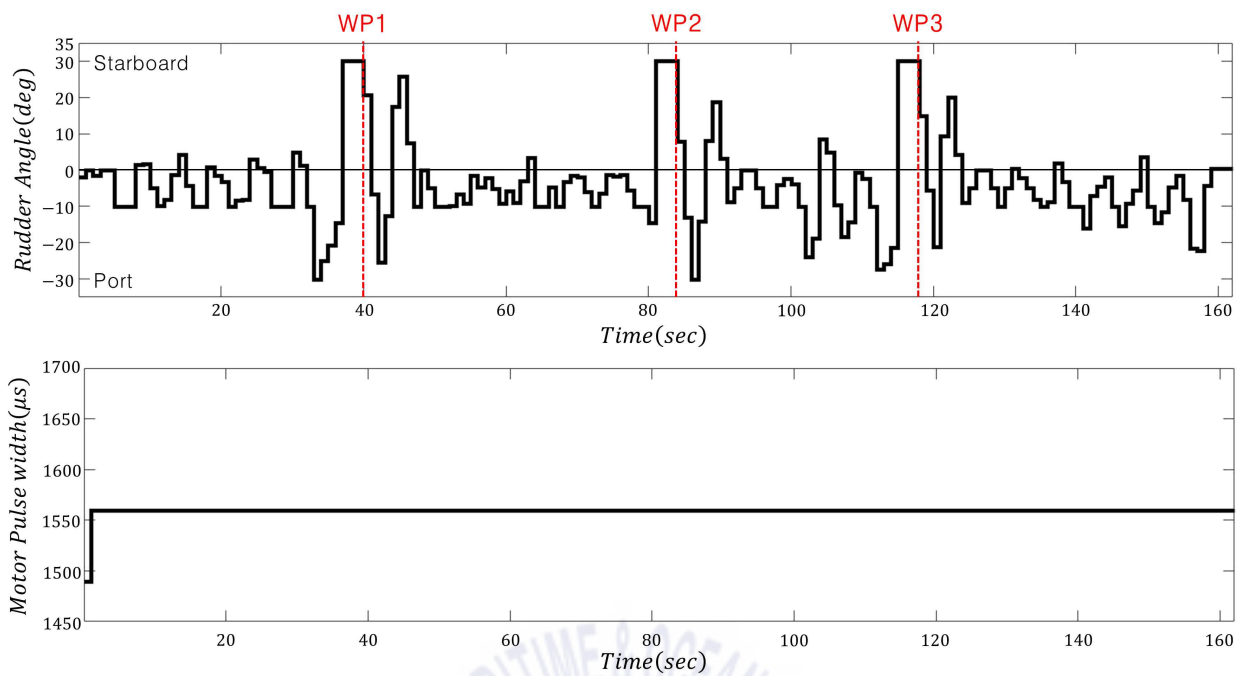


Fig. 4.3 Master ship rudder angle and motor pulse width during the first sea trial

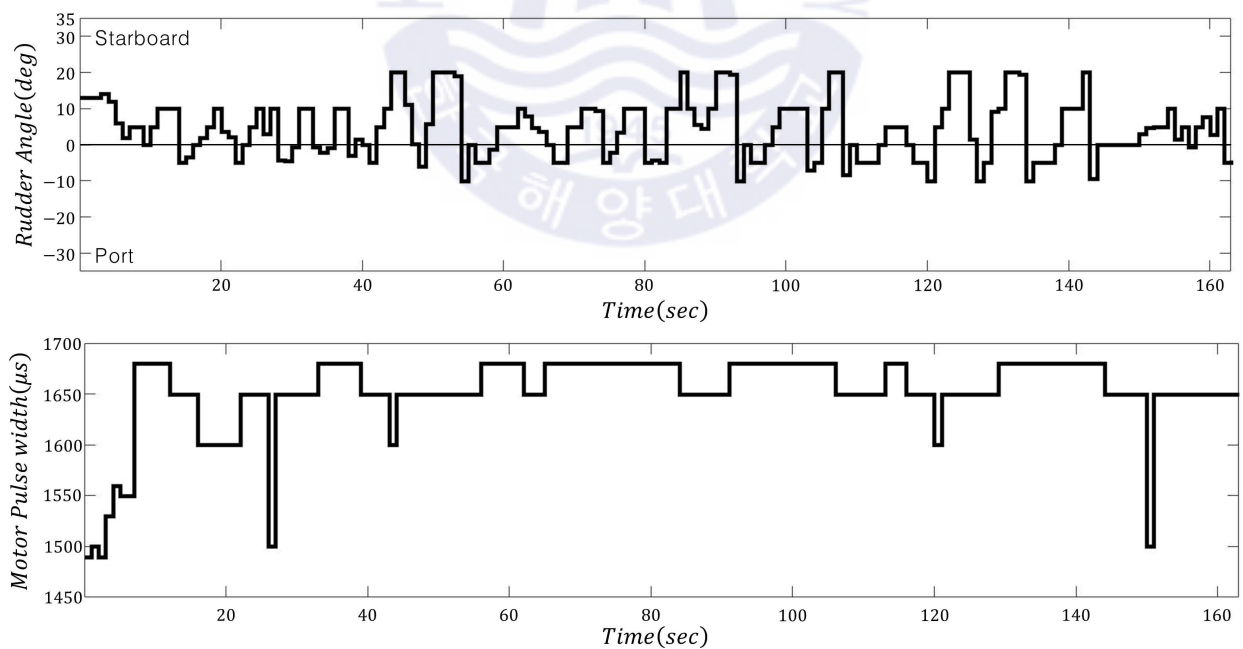


Fig. 4.4 Slave ship rudder angle and motor pulse width during the first sea trial

(1) 해상실험 2

두 번째 해상실험은 RF 조종기로 수동조작하여 호송선을 시계반대방향으로 항해하게 하면 추종선이 호송선의 경로를 올바르게 추종하는지 검증하기 위하여 수행되었다. Fig. 4.5는 두 번째 해상실험 동안 수집한 보트의 데이터의 일부를 나타낸 것으로, Fig. 4.1과 마찬가지로 쉼표(,)로 구분한 9개의 정보를 담고 있다.

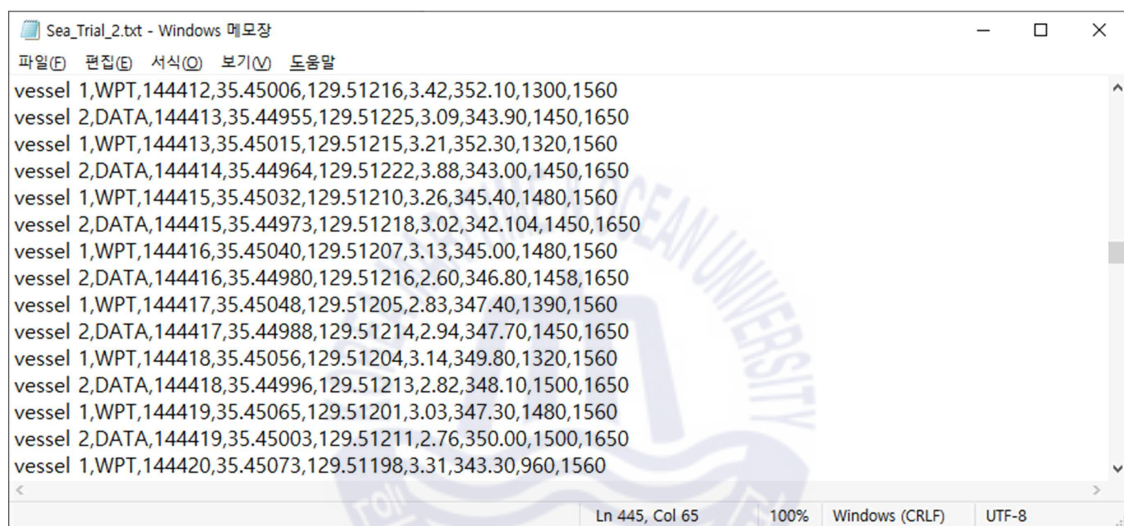


Fig. 4.5 Log data at the second sea trial

Fig. 4.6은 두 번째 해상실험 동안 두 보트의 항적 중 일부를 나타낸 것이다. 그래프의 초록색 선은 호송선의 항적을 의미하며, 빨간색 선은 추종선의 항적을 의미한다. 그리고 그래프에 표시된 시간은 보트가 해당 위치를 지날 때의 시각을 나타낸다. 호송선은 RF 조종기를 통해 시계 반대 방향으로 수동항해하였으며, 추종선은 호송선의 항로를 일정 거리를 두고 자동으로 추종하였다.

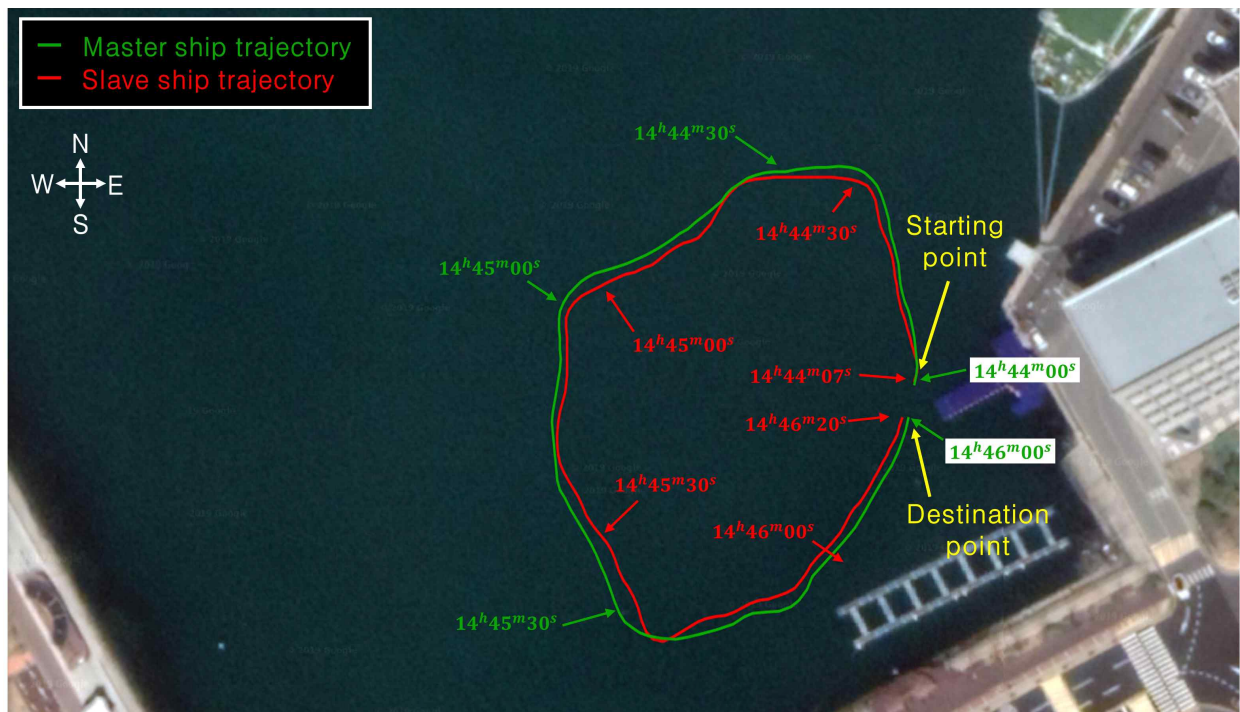


Fig. 4.6 Master and slave ships trajectories during the second sea trial

Fig. 4.7 및 Fig. 4.8은 두 번째 해상실험 동안 호송선과 추종선의 타각과 모터의 펄스 폭을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 첫 번째 해상실험과는 반대로 호송선이 시계 반대 방향으로 항해하였기 때문에 타를 주로 좌현으로 사용하였으며, 모터의 펄스 폭을 조절하여 속력을 변화시켰다. 추종선은 침로를 유지하기 위해 지속적으로 타를 사용하였으며, 호송선과의 거리를 좁히고자 펄스 폭을 증가시킨 것을 알 수 있다. 호송선과 추종선의 평균 속력은 약 7.2 kn(3.7 m/s)와 6.2 kn(3.2 m/s)로 나타났다.

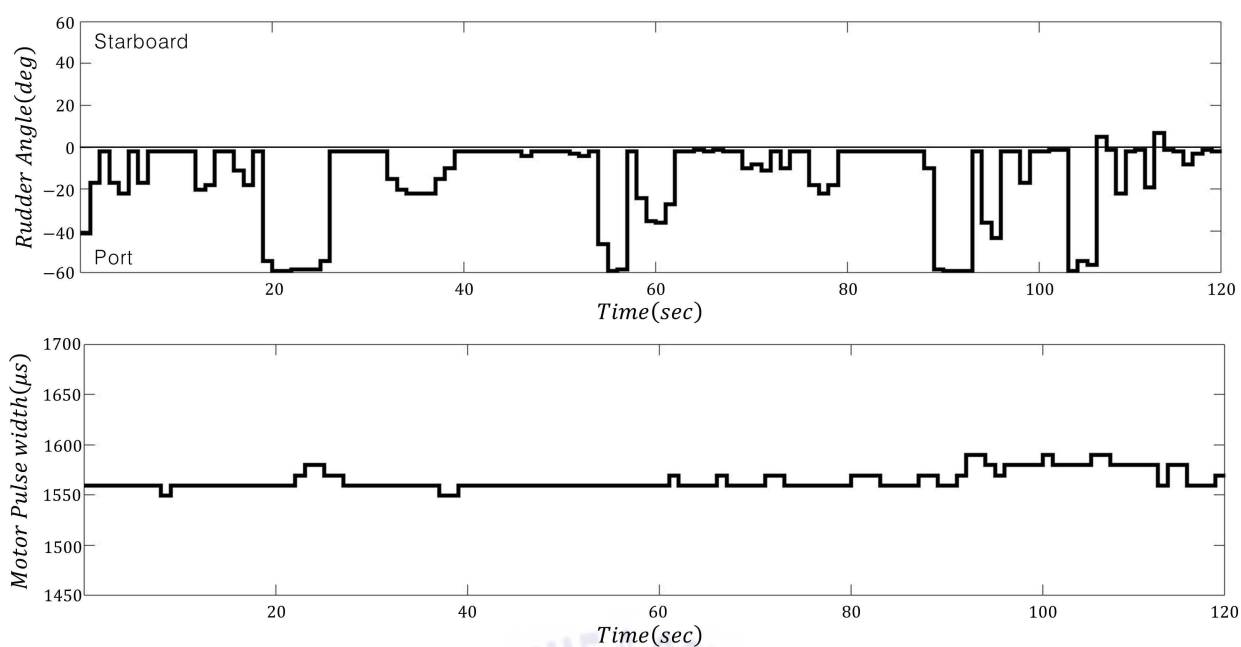


Fig. 4.7 Master ship rudder angle and motor pulse width during the second sea trial

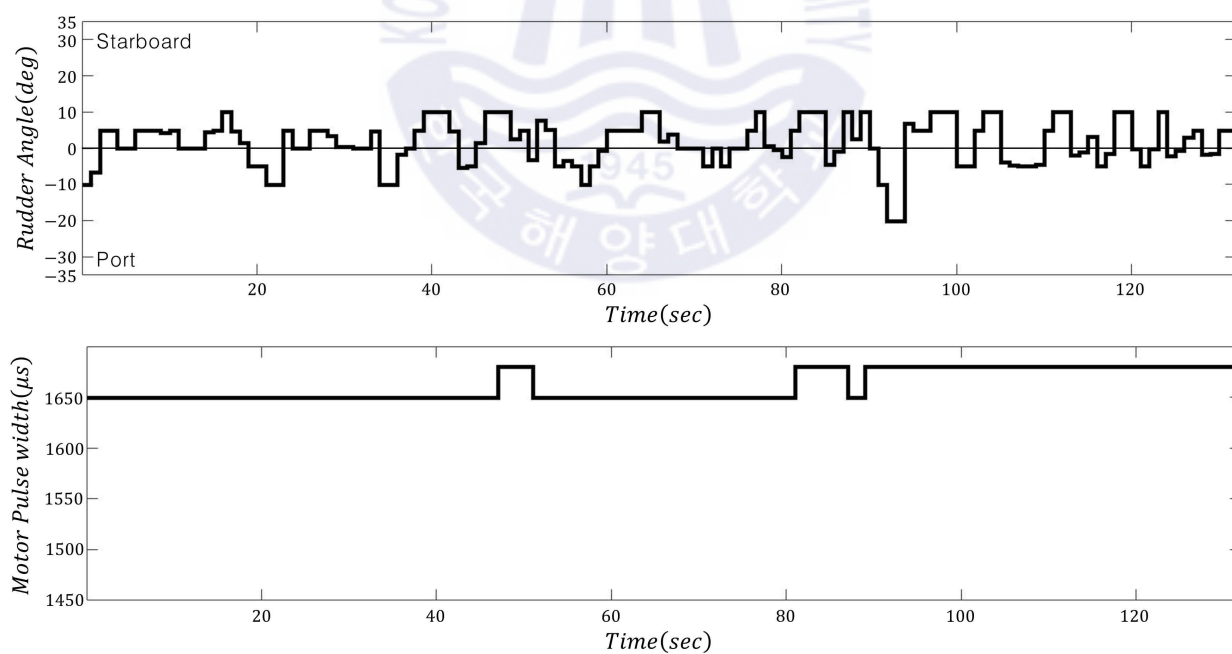


Fig. 4.8 Slave ship rudder angle and motor pulse width during the second sea trial

제 5 장 결 론

본 논문에서는 자율운항선박 개발의 일환으로 한 척의 선박이 다른 한 척의 선박을 이끄는 호송항법시스템을 개발하고자 하였다.

이를 위해 시판 중인 두 대의 RC모형보트를 개조하여 실험에 사용하였다. 개조된 RC모형보트는 추진시스템, 조타시스템 및 데이터처리시스템으로 이루어져 있다. 추진 및 조타시스템은 펄스 폭 변조 방법을 통해 보트의 추진 및 조타장치를 제어하였으며, 데이터처리시스템은 무선랜과 직렬 통신을 통해 데이터를 송수신하고, 수집된 데이터를 설계된 알고리즘에 따라 처리하여 추진 및 조타시스템을 제어하였다.

또한, 경로설정 알고리즘, 타각제어 알고리즘 및 속력제어 알고리즘을 설계하였다. 경로설정 알고리즘은 추종선이 TCP/IP 통신과 직렬 통신을 이용하여 수집한 호송선의 위치 정보를 변침점으로 설정하고 변침점까지의 침로 및 항정을 중분위도항법을 이용하여 계산하도록 설계하였다. 타각제어 알고리즘은 Nomoto 모델과 ARX 모델을 이용하여 선박조종운동 방정식을 추정하고, 추정된 선박조종운동 방정식을 통해 구현된 PD 제어가 타각을 제어하여 계산된 목표침로를 추종하도록 설계하였다. 속력제어 알고리즘은 실시간으로 두 보트 사이의 거리를 계산하고, 보트 사이의 거리에 따라 추종선의 속력을 조절하여 보트 사이의 거리를 일정하게 유지하도록 설계하였다.

그리고 두 차례의 해상실험을 통해 파도, 바람 등의 외부 환경의 영향에도 불구하고 추종선이 수동 및 자동으로 항해한 호송선과 일정 거리를 유지하며 경로를 추종하는 결과를 얻음으로써 호송항법시스템의 유효성을 검증하였다. 이는 자율운항선박의 기술이 완전히 개발되지 않은 시점에 선박의 유지보수, 보안 기술 및 긴급하게 발생할 수 있는 여러 문제에 효율적으로 대처할 수 있는 한 방법이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

그러나 너울, 바람 등의 외부 영향을 직접 받는 개방된 수역에서 1m 내외로 크기가 작은 두 대의 모형보트로 실험을 진행하기에는 정확한 데이터를 획득하는 것에 어려움이 있었다. 이는 추후 GPS 신호가 수신되고 외부 영향을 받지 않는 개방된 정온 수역의 실험을 통해 보트의 정확한 동적 데이터를 확보하는 것으로 보완할 것이며,

이를 기반으로 호송항법시스템의 신뢰성을 향상하고자 한다. 또한, 최소 두 척의 추종선을 이용한 실험을 통해 본 연구에서 구현된 기초 연구로서의 호송항법시스템을 확장하고자 한다.



참고문헌

- [1] 김효일, 2011. *무선인터넷 기반의 무인선박 제어에 관한 연구*. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교
- [2] 윤여정, 전승환, 문성배, 2013. *지문항해학*. 한국해양대학교 해사도서출판부.
- [3] 이철영, 김시화, 김환수, 1985. P.I.D.형 자동조타장치에 대한 약간의 고찰. *한국항해학회지*, 9(2), pp.13-26.
- [4] 한국해양수산개발원, 2018. *자율운항선박 도입 관련 대응정책 방향 연구*, 부산:한국해양수산개발원.
- [5] 해양수산부, 2019. *바다 위 4차 산업혁명, 자율운항선박 개발 프로젝트 본격 착수*, 보도자료
- [6] Åström, K.J., & Hägglund, T., 1984. Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. *Automatica*, 20(5), pp.645-651.
- [7] Åström, K.J., & Hägglund, T., 1995. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2nd Ed. Instrument Society of America.
- [8] Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons.
- [9] International Maritime Organization (IMO), 2018. *Report of the maritime safety committee on its ninety-ninth session(Agenda item 5)*. MSC 99/22
- [10] International Maritime Organization (IMO), 2019. *Interim guidelines for MASS trials*. MSC.1/Circ.1604
- [11] Liu, Y., and Bucknall, R., 2015. Path planning algorithm for unmanned surface vehicle formations in a practical maritime environment. *Ocean Engineering*, 97, pp.126-144.
- [12] Ljung, L., 1987. *System identification: Theory for the user*. Prentice Hall.
- [13] Mäkelä, H., Kaarmila, P., and Koskinen K., 1998. Convoy Navigation. In: Salichs, M.Á. and Halme, A., *Proceedings of 3rd IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, Madrid, March 25-27, 1998, Oxford: Pergamon, pp.627-632.
- [14] McCormack, A.S., & Godfrey, K., 1998. Rule-based autotuning based on frequency domain identification. *IEEE Transactions on control Systems Technology*, 6(1), pp.43-61.

- [15] Meyer, B.A., 2017. Python GUI Programming Cookbook. 2nd Ed. Translated by D.H. Kim, 2018. Acorn publishing.
- [16] NYK Line, 2019. *NYK Conducts World's First Maritime Autonomous Surface Ships Trial*. [Online] (Updated 30 September 2019) Available at: <https://www.nyk.com> [Accessed 10 December 2019].
- [17] Rawson, K.J., & Tupper, E.C., 2001. Basic Ship Theory. 5th Ed. Butterworth-Heinemann.
- [18] Shin, J.H., Kwak, D.J., and Lee, Y.I., 2017. Adaptive Path-Following Control for an Unmanned Surface Vessel Using an Identified Dynamic Model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(3), pp.1143-1153.
- [19] Yara International, 2018. *YARA selects Norwegian shipbuilder VARD for zero-emission vessel Yara Birkeland* [Online] (Updated 15 August 2018) Available at: <https://www.yara.com> [Accessed 25 October 2019].
- [20] Ziegler, J.G., Nichols, N.B. & Rochester, N.Y., 1942. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Trans. ASME*, 64, pp.759-768.