



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

능동형 펜더를 기반으로한 접안지원
시스템 개발에 관한 연구



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계공학학연융합학과

김 창 우

공 학 박 사 학 위 논 문

능동형 펜더를 기반으로한 접안지원
시스템 개발에 관한 연구

지도교수 김 영 복

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계공학학연융합학과

김 창 우

김창우의 공학박사 학위논문을 인준함

2022년 2월 25일



위원장 공학박사 류지열 (인)

위원 공학박사 서진호 (인)

위원 공학박사 지상원 (인)

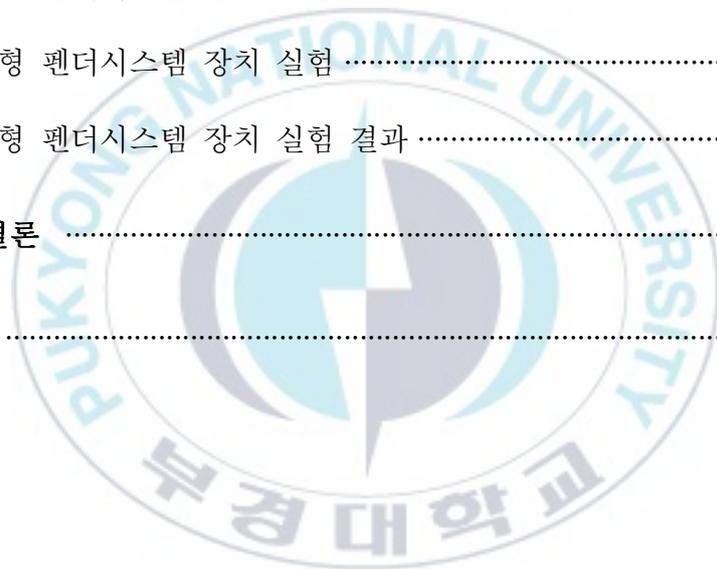
위원 공학박사 박환철 (인)

위원 공학박사 김영복 (인)

목 차

Abstract	iii
List of Figures	vi
List of Tables	ix
Nomenclature	x
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구방향 및 연구목표	5
제 2 장 시스템의 구성 및 모델링	7
2.1 선박의 운동에 관한 일반적인 표현	7
2.2 능동형 선박 접안 시스템 모델링 및 제어기 설계	13
2.3 능동형 선박 접안 시스템 모형실험장치 구성	21
2.4 능동형 선박 접안 시스템 동특성 분석	25
제 3 장 모형 실험 장치의 제어기 설계	29
3.1 서론	29
3.2 PID 제어기 설계	35
3.3 Sliding mode 제어기 설계	39

제 4 장 모형 실험 및 결과	44
4.1 선박 접안 모형 실험	44
4.2 선박 접안 모형 실험 결과 분석	49
제 5 장 실선 실험 및 결과	50
5.1 능동형 선박 접안 시스템 실선 실험	50
5.2 능동형 펜더시스템 장치 구성	52
5.3 능동형 펜더시스템 장치 실험	58
5.4 능동형 펜더시스템 장치 실험 결과	61
제 6 장 결론	65
참고문헌	67



A Study on the Development of Ship Berthing System using Active Fenders

Chang-Woo Kim

MR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering

The Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

The operation of ships for a long time has been automated through various studies. Recent research on automation of ships is being conducted with the goal of autonomous operation. The technology that ships operate in the ocean is based on various technologies such as GPS and radar, and has reached the degree to which they operate automatically under the observation of seaman. However, it is difficult to adjust the ship by autonomous operation from the entry into the port, which is the stage where the ship completes its voyage.

In addition to controlling the movement of the ship itself, the berthing of the ship should also take into account many variables such as the amount of ship passage at the port, current, wind, and port facilities. The marine environment in which the ship moves continuously changes the hydrodynamic elements of

the ship, and the movement of the ship in the port creates an environment in which it is difficult to control the movement by itself. During the berthing process of the ship, the speed is lowered to make the movement of the ship precise. When the moving speed of the ship is slowed, the controllability of the direction and position of the ship is greatly reduced. The advantage of a high energy efficiency means of transportation, such as a ship moving with little energy in the marine environment and switching directions using a small force, is a disadvantage in the ship berthing process within the port. As such, ship berthing is a very difficult task in the operation of ships.

In the ship berthing process, the ship's own berthing using only the ship's main thruster and thruster requires a high level of strong control. In addition, it is essential to identify characteristics of individual ports, tonnage of ships, and ship type, and to control ships by experienced seaman who can operate ships. Depending on the size of the ship and the characteristics of the port, external assistance such as pilots and tug boats is also required.

Due to the safety of the ship in the process, the speed of movement and berthing in the port are very limited. In particular, depending on the skill level of the seaman of the ship, the berthing time may show a big difference.

In this study, we propose a technology for a new berthing support system that can improve the difference in ship berthing safety and speed according to the judgment of the captain and external assistance. The ship berthing support system was installed at the dock to assist the external force pushed by the tugboat with the onshore winch and rope, and to stabilize the speed and position at which the ship approaches the pier. The position of the ship was measured using an optical sensor, and the position control of the ship was

proposed to cooperate with the tension applied to the rope and the pressure applied to the damper. The proposed ship berthing support system verified the speed and stability of ship berthing through model experiments, and verified the validity of the technology through ship berthing experiments using manufactured equipment.



List of Figures

Fig. 1-1 Ship berthing process	1
Fig. 1-2 Ship autonomous berthing system(CAVOTEC)	3
Fig. 1-3 Autonomous mooring operation system	4
Fig. 1-4 Ship berthing accident	5
Fig. 2-1 Motion variables for a marine vessel	7
Fig. 2-2 Vessel motion with the assistance of damper-winch system	10
Fig. 2-3 Damper system (one-way control)	13
Fig. 2-4 Block diagram of damper control system	14
Fig. 2-5 Winch system	15
Fig. 2-6 Block diagram of winch system	15
Fig. 2-7 Winch motor control input	17
Fig. 2-8 Winch drum angle	17
Fig. 2-9 Winch simulation response comparison	18
Fig. 2-10 Block diagram of servo-system for berthing	19
Fig. 2-11 Configuration of experiment system	21
Fig. 2-12 Data path between test model equipment	22
Fig. 2-13 Configuration of experiment system	25
Fig. 2-14 Motor applied voltage and output (rope tension) for transfer function identification	26
Fig. 2-15 Tension graph of experimental value and transfer function output	28

Fig. 3-1	Schematic diagram for experimental equipments	30
Fig. 3-2	Signal flow diagram of control system	30
Fig. 3-3	Block diagram of PID control system	31
Fig. 3-4	Simulation result with PID-controller	36
Fig. 3-5	Tension tracking experiment result with PID control system	37
Fig. 3-6	Block diagram for Sliding Mode Controller	39
Fig. 3-7	Simulation result with Sliding Mode controller	40
Fig. 3-8	Tension tracking experiment result with Sliding Mode controller	41
Fig. 4-1	Method of experiment	45
Fig. 4-2	Result of comparing with PID and SMC control for experiments	45
Fig. 4-3	Experimental result for tension	47
Fig. 4-4	Experimental result for voltage	48
Fig. 5-1	Schematic drawing of the berthing assistance system	52
Fig. 5-2	Assembled and attached fender system for berthing	53
Fig. 5-3	Cylinder(up) and cylinder inside fender system(down)	54
Fig. 5-4	Front side of the fender(attaching part)	55
Fig. 5-5	Winch system installed on the fender system	55
Fig. 5-6	Fender system control units	56
Fig. 5-7	Dynamic responses of the fender cylinders	56
Fig. 5-8	Ship berthing test arrangement plan	58
Fig. 5-9	Flowchart for configuration the GUI system	59
Fig. 5-10	GUI monitoring system	59

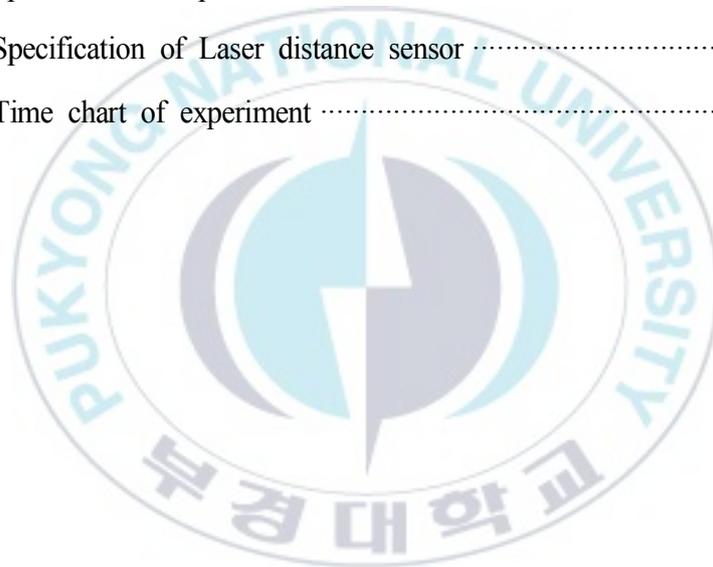
Fig. 5-12 Strock of fender cylinder and distance of ship from quay side (stern side) 63

Fig. 5-11 Strock of fender cylinder and distance of ship from quay side (bow side) 63

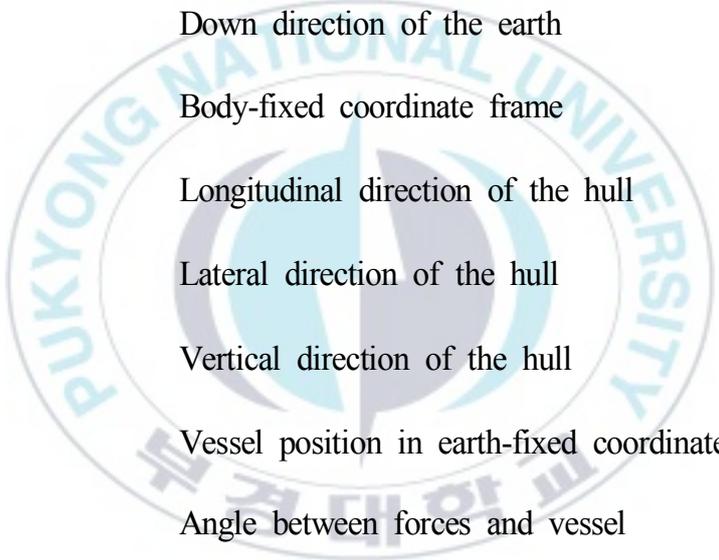


List of Tables

Table 2-1 The notation of SNAME for a marine vessel	8
Table 2-2 Specification of DC motor	23
Table 2-3 Specification of DC motor controller	23
Table 2-4 Specification of pressure sensor	24
Table 2-5 Specification of Laser distance sensor	24
Table 5-1 Time chart of experiment	61



Nomenclature



O_n	Earth-fixed coordinate frame (North-East-Down frame)
X_n	North direction of the earth
Y_n	East direction of the earth
Z_n	Down direction of the earth
O_b	Body-fixed coordinate frame
X_b	Longitudinal direction of the hull
Y_b	Lateral direction of the hull
Z_b	Vertical direction of the hull
η	Vessel position in earth-fixed coordinate frame
ν	Angle between forces and vessel
ψ	Heading angle of vessel
x_e	x axes of earth-fixed coordinate frame
y_e	y axes of earth-fixed coordinate frame
x_b	x axes of body-fixed coordinate frame
y_b	y axes of body-fixed coordinate frame

f_{W1}, f_{W2}	Forces by winch
f_{D1}, f_{D2}	Forces by damper
l_{W1}, l_{W2}	Winch distance to the action point
l_{D1}, l_{D2}	Damper distance to the action point
τ	Forces in body-fixed coordinate frame
m	Mass of vessel
Y_v, Y_r, Z_v, N_r	Added mass by fluid
I_z	Inertia moment around z axis
$R(\psi)$	Rotation matrix
η	Vessel position in earth-fixed coordinate frame
$U(s)$	Input voltage in frequency domain
$Y(s)$	Output force in frequency domain
K_p, K_v, K_d	PID controller gain value
u_{PID}	Control input value from PID controller
y_d	Reference value
y	Present value
e	Error signal

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

선박의 운항에서 접안과 이안 작업은 오랜 시간의 항해를 통해 이동하는 선박의 다양한 움직임 중에서 좁은 공간에서의 상대적으로 이동 속도가 상당히 느리게 진행되어야 하는 작업이다. 선박이 부두 설비와 가까워질수록 선체는 충돌을 회피하기 위해 선박 자체 및 부두 설비의 도움으로 위험성을 낮추는 강인한 제어가 요구된다.^[1]

선박의 접안과 이안 작업에 필요한 주요 요소는 첫 번째로 저속에서 선박의 움직임과 조향 성능이 제한되는 특성을 보완한 외부적인 도움인 예인선의 조력 또는 선박의 선수와 선미에 설치된 스러스터의 역할이 있다.^[2]



Fig. 1-1 Ship berthing process

선박이 각 위치에서 적절한 운동을 할 수 있도록 접안하고자 하는 선박과는 독립적인 위치에서 대상 선박에 접이안에 요구되는 외력을 전달하는 역할이다. 선박의 스러스터는 선박 자체의 제한된 운동 성능을 보완하는 역할이다.

두 번째, 선박 자체의 윈치 및 로프가 있다. 해당 장비는 선박 접안에 윈치를 사용하기 시작한 시점부터 꾸준히 연구되고 상용화되어 활용되는 방법이다. 선박의 윈치 조작은 부두에 로프를 연결하는 것부터 선박이 부두에 안정적으로 정박할 때까지 선원에 의해 조작된다. 해당 부두의 조류, 파고, 바람 등의 변수를 파악한 선장의 판단과 각 위치에 배치된 숙련된 선원의 판단이 안전한 접안에 많은 영향을 미친다.

마지막으로 부두 설비의 협조가 필요하다. 선박은 부두와의 거리가 좁혀질수록 선박의 움직임을 최종적으로 결정하는 선교에서 볼 수 없는 사각지대가 다수 발생하게 된다. 따라서 부두에서 선박의 위치를 정확히 확인해주는 표식과 위치를 알려주는 사람이 필요하고, 무엇보다 선박이 부두로 접근하여 단단히 고정될 수 있도록 연결해주는 계선줄을 부두에 걸어주는 접안 요원의 역할이 필요하다. 해당 작업은 선박의 크기와 무게가 커질수록 계선줄을 당기는 부두의 추가적인 윈치 설비도 요구되며, 그 인원 또한 선박과 부두의 규모에 비례해 증감되어야 하나 현실적으로 제한된 인원으로만 지원되는 실정이다.^{[3]-[5]}

선박의 접안과 이안 작업에는 숙련된 다수의 인원이 요구되고 그 인원간의 원활한 소통이 반드시 요구되는 사항이다. 실제로 선박의 접안 시 아주 사소한 실수로도 윈치의 로프에 임계점 이상의 장력이 발생하여 파단되거나 예기치 못한 변수로 인해 선박의 접안 속도를 제어하지 못하는 경우도 발생하고 있다. 접안에 걸리는 시간은 대개 선박의 톤수에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다.^{[6]-[10]}



Fig. 1-2 Ship autonomous berthing system(CAVOTEC)

많은 산업 장비들이 자동화되는 추세에 선박의 접안 작업은 전 세계 다수의 항구에서 처음 원치를 상용화하여 사용하기 시작한 시점부터 그 방법이 개선되거나 자동화된 비율이 낮다. 최근 개발되거나 연구 중인 접안 자동화 장치는 다음의 두 가지 방법을 확인할 수 있다.

자동화된 접안 장치로는 CAVOTEC사의 장비가 있으며, 부두에 설치된 자동화 장비를 통해 근거리까지 접근한 선박을 다수의 진공 패드를 통하여 고박하는 방법을 사용하고 있다. 접안의 주요 요소 중 선박의 역할인 원치의 역할을 자동화시킨 것으로 기존의 접안 방법과 비교했을 때 접안 안정성을 고려하면 접안작업의 난이도를 낮추어 접안 안정성을 개선한 방법이다. 접안과정의 신속화나 안정화보다는 접안 중인 선박의 계류 안정성에 관한 것으로 본 연구에서 제안하는 방법이 본선과 외력(예인선)에 의한 조력 부분을 보완하는 것과는 다른 접안 자동화로 분류할 수 있다.^[11]

선박의 계선줄 즉, 선박 원치의 로프를 육상의 도움없이 선박 자체적으로 연결 가능한 장비의 개발에 관한 연구도 진행된 사례가 있다. 비전 센서로 육상의 블라드의 위치를 자동으로 확인하여 로봇을 이용하여 선박의 계선줄을 육상의 블라드에 자동으로 상기 자동화된 접안 장치와 같이 선박이 부두에 근거리로 접근한 후 진행되어야 하는 한계가 있는 것으로 판단된다.^{[67]-[68]}

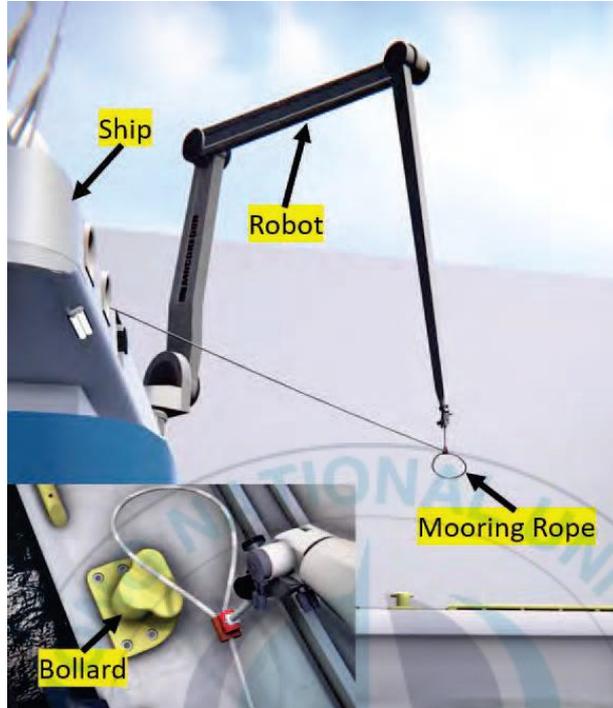


Fig. 1-3 Autonomous mooring operation system

선박의 자동화된 접안 방법은 다수의 연구에서 그 방법이 다양하게 제안되고 있다. 선박이 현재 사용되는 윈치와 로프를 활용하고 예인선의 도움을 받는 방법을 개선하여 속도와 안정성을 높이려면 접안의 각 주요 요소를 통합하거나 보완하는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 단순히 선박이 부두에 부딪히는 상황에서 쿠션 역할을 하는 보완재인 펜더를 개선하는 방법을 제안한다. 제안되는 능동형 펜더는 기존의 터그보트에 해당하는 독립적인 외력을 자체의 윈치와 로프로 설계하였으며, 비교적 빠른 속도로 수렴되는 접안 과정을 보완하기 위해 능동형 댐퍼로 선박의 접안 속도를 일정하게 유지하는 방법을 고안하였다. 이때 고려되는 윈치시스템의 제어와 로프의 장력에 대한 설계가 필요하다.

1.2 연구방향 및 연구목표

선박의 접안은 선박 운항에 있어서 매우 중요한 작업이며 다수의 요소에서 제어가 복합적인 제어가 필요하다. 접안에 있어서 선박과 부두 시설 간의 거리에 관한 제어는 선박이 안전하게 접안작업을 수행할 수 있는가에 대한 문제에서 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

선박이 부두 측면으로 접근하는 동안의 속도를 제어하지 못하면 선박의 관성력을 억제하지 못하고 부두 혹은 부두 시설, 근접하여 접안 중인 다른 선박과의 충돌을 피할 수 없게 된다. 이를 제한하기 위한 최소한의 안전장치로 펜더를 들 수 있지만, 선박의 전체 하중이 실린 관성력을 억제하기에는 무리가 있다. 펜더는 접안 중 발생하는 파고, 조류, 바람의 미소한 변수에만 대응하기 위한 최소한의 안전장치에 해당한다.

선박의 접안에 필요한 요소를 선박의 움직임에 관여하는 힘을 기준으로 구분해 보면 선박이 부두에 접근하는 움직임에 해당하는 힘과 이러한 선박의 관성력을 억제하는 힘으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 선박의 접안과정의 자동화를 위해 기존의 접안 방식에서



Fig. 1-4 Ship berthing accident

유효한 선박 제어(윈치와 로프), 외력 제어(예인선), 육상지원(선박 위치 제어) 부분에서 선박과 외력 제어를 통합하여 그 역할을 육상의 새로운 접안 장치를 통해 지원하는 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 장비의 윈치와 로프의 장력 제어를 위한 모델링을 통한 시뮬레이션을 바탕으로 그 안정성을 확인하고, 댐퍼를 통해 선박의 충격을 최대한 흡수할 수 있도록 설계하여 제안된 방법에서의 선박의 접안이 신속하고 충분한 안정성을 갖추는지를 검증하기 위해 모형실험과 실제 선박의 접안 실험을 통해 확인한다.



제 2 장 시스템의 구성 및 모델링

2.1 선박의 운동에 관한 일반적인 표현

선박의 운동을 수식화하기 위한 방정식으로 표현하기 위한 해양에서의 선박 운동변수에 대한 좌표계를 Fig. 2-1로 나타내고 그 변수를 Table. 2-1에 표기하였다. X, Y, Z 는 3차원의 각 방향에 대한 힘을 나타내고 x, y, z 는 3차원 각 방향을 나타낸다. u, v, w 는 각 방향에 대한 선속도를 나타내고, 각속도는 p, q, r 로 표현하였다. 그리고 각 축에 대한 모멘트는 K, M, N 로 표기하고, 그리고 각도는 ϕ, θ, ψ 로 나타내었다.

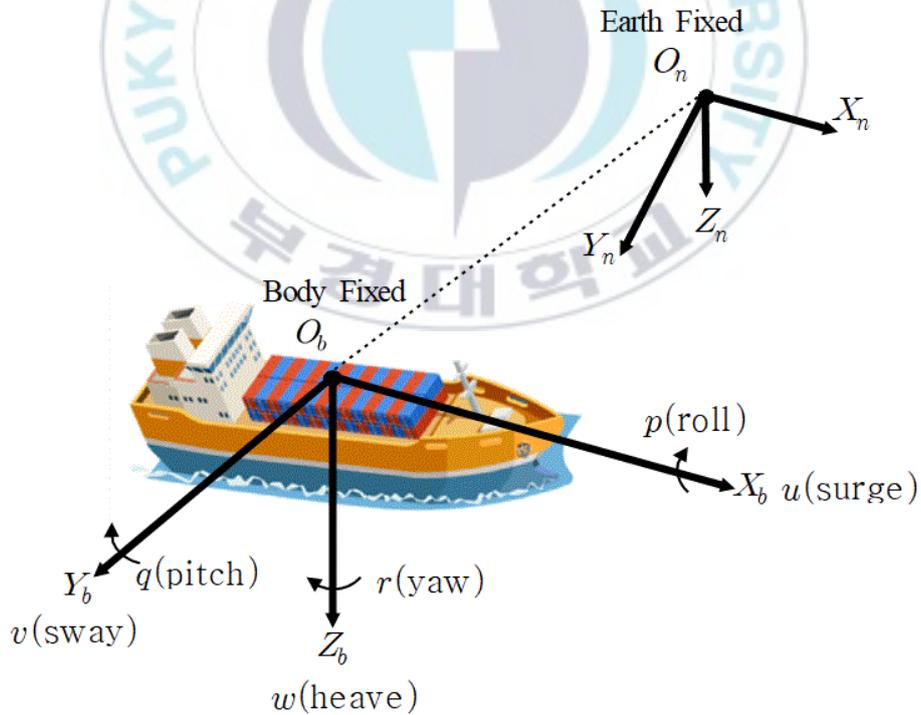


Fig. 2-1 Motion variables for a marine vessel

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

DOF		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)	K	p	ϕ
5	Rotation about the y_b -axis (pitch)	M	q	θ
6	Rotation about the z_b -axis (yaw)	N	r	ψ

해양에서의 선박 운동을 해석하기 위해 지구-고정, 선체-고정에 대한 두 가지 좌표계를 도입하였으며, 이를 통해 선박 운동에 대해 표현하였다. 지구-고정 좌표계는 지구 좌표를 기준으로 하는 $O_n - X_n, Y_n, Z_n$ 지구-고정 좌표계 혹은 North-East-Down(NED)좌표계이다. 좌표계에 표기된 각 축은 다음 정의된 방향을 양의 값으로 한다.

- X_n 축 : 지구고정 좌표의 북쪽 방향
- Y_n 축 : 지구고정 좌표의 동쪽 방향
- Z_n 축 : 지구고정 좌표에서 지표면과 수직으로 들어가는 방향

다음으로 선체에 좌표축이 고정된 $O_b - X_b, Y_b, Z_b$ 선체-고정좌표계가 있다. 이는 계산상의 편의를 위해 원점을 선체의 무게중심점에 두고 있다. 좌표계의 각 축은 아래의 축에서 괄호 속의 방향을 양의 값으로 나타낸다.

- X_b 축 : 선체의 원점에서 종방향 (무게중심에서 선수 방향)
- Y_b 축 : 선체의 원점에서 횡방향 (무게중심에서 우현방향)
- Z_b 축 : 선체의 원점에서 수직방향 (위에서 아래 방향)

선박이 지속적으로 운항되는 선박의 접이안 작업 때는 선박이 별도의 동력 없이 제안된 시스템의 댐퍼와 윈치만으로 조종되는 제어대상으로 고려한다. 단, 본 연구에서는 선박의 평면상의 운동을 고려하기 때문에 서지(surge), 스웨이(sway) 그리고 요우(yaw)방향 운동만 고려하였다. 그리고 대상 시스템이 다음 세가지 조건을 만족할 때,

- 1) 선박의 중심선은 선체-고정좌표계의 원점을통과 한다.
- 2) 대상 선박의 선체 질량은 균일(homogenous)하다.
- 3) XZ평면은 대칭(symmetric)이다.

선박의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= R(\psi)\nu \\ M\dot{\nu} + D\nu &= \tau \end{aligned} \quad (2-1)$$

여기서 $\eta = [x, y, \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 지구-고정좌표계에서의 위치(x, y)와 각도 ψ 에 대한 관성 위치를 나타낸다. $\nu = [u, v, r]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 선체-고정좌표계에서 서지, 스웨이 그리고 요우 방향 속도를 의미한다. 그리고 $R(\psi)$ 는 선박 좌표에서 관성 좌표로 변환시키는 변환 행렬로 다음과 같이 나타낸다.

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$M \in R^{3 \times 3}$ 은 관성 행렬이고, m 가 질량을 포함한다.

$$D = \begin{bmatrix} 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -N_v - N_r \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

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

m 은 선박 질량을 나타내며, I_z 은 선박의 z 축에 대한 관성 모멘트, X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 은 각각 유체 동역학적 부가질량을 나타낸다. X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 은 선형 감쇠 계수를 나타내고, $D \in R^{3 \times 3}$ 은 감쇠 행렬을 나타낸다.

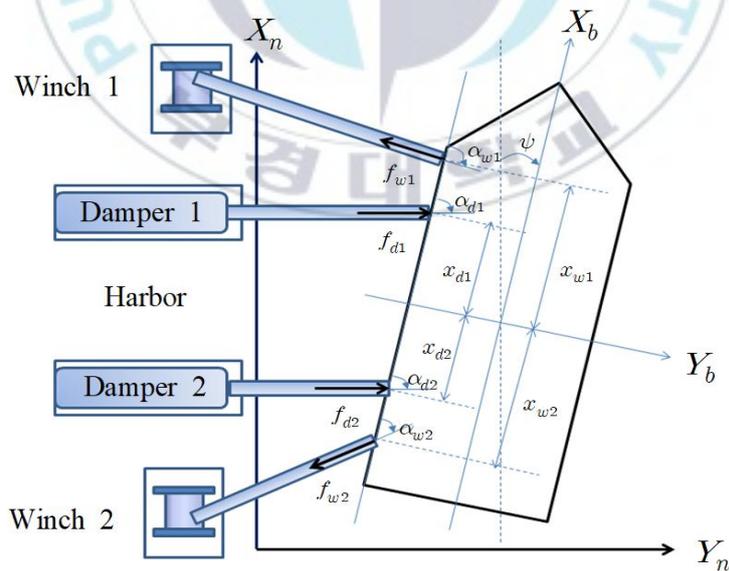


Fig. 2-2 Vessel motion with the assistance of damper-winch system

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -N_v - N_r \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$\tau = [\tau_x, \tau_y, \tau_\psi] \in R^3$ 에서 각각의 액추에이터에 의해 선박에 작용하는 움직임은 서지 및 스웨이 방향과 외력(τ_x, τ_y)과 요우방향 모멘트(τ_ψ)을 포함하며,

$$\tau = T(\alpha)f \quad (2-5)$$

로 정리할 수 있다.

Fig. 2-2에서 확인할 수 있듯이 $f = [f_{D1}, f_{D2}, f_{W1}, f_{W2}]^T$ 은 선박에 작용하는 댐퍼와 윈치 각각의 힘을 나타낸다. 단, 본 연구에서 각각의 액추에이터의 특성상 윈치는 대상 선박을 당기는 힘, 댐퍼는 대상 선박을 미는 힘을 사용한다. 즉, 액추에이터는 양방향성이 아닌 단방향성을 고려한다.

선박과 액추에이터로 이루어진 시스템의 기하학적 구성은 $T(\alpha) \in R^{3 \times 4}$ 로 나타낸다. 이때, 액추에이터에 작용하는 힘과 선체-고정좌표계 상의 축이 이루는 각도는 α_{ij} 로 나타내고, 축을 중심으로 시계 방향을 양의 값으로 둔다. 선체-고정좌표계에서는 원점을 기준으로하여 액추에이터의 위치를 (x_{ij}, y_{ij}) 이라고 할 때,

$$T(\alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha_{D1} s\alpha_{D1} - x_{D1}c\alpha_{D1} + y_{D1}s\alpha_{D1} \\ c\alpha_{D2} s\alpha_{D1} - x_{D2}c\alpha_{D2} + y_{D2}s\alpha_{D2} \\ c\alpha_{W1} s\alpha_{D1} - x_{W1}c\alpha_{W1} + y_{W1}s\alpha_{W1} \\ c\alpha_{W2} s\alpha_{D1} - x_{W2}c\alpha_{W2} + y_{W2}s\alpha_{W2} \end{bmatrix}^T \quad (2-6)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서 $c\alpha_{ij} = \cos(\alpha_{ij})$, $s\alpha_{ij} = \sin(\alpha_{ij})$ 이다.



2.2 능동형 선박 접안 시스템 모델링 및 제어기 설계

제안된 접안지원 시스템의 댐퍼는 Fig. 2-3과 같은 공압 실린더로 구현하였다. 그리고 항만 내 여러 안벽에 적용될 수 있도록 이동식으로 제안하여 항만 설비와 선박의 위치에 따른 효용성을 확보하였다. 본 연구에서 제안하는 새로운 접안 방식은 육상의 부두에 설치된 원자로 선박을 적절히 당기고 댐퍼가 선박의 움직임에 대한 완충작용을 하며 접안을 완료한다. 이때, 댐퍼의 반력은 적절히 유지되어야 한다. 댐퍼의 압력조절밸브는 개폐 작업을 적절히 조절하여 선박이 과한 움직임으로 안벽에 접근하지 않도록 구성하였다. 제안된 장비의 댐퍼는 다양한 선박과 항만 설비에 대응하도록 안벽에 고정되어 있지 않고 유동성을 지닌 채 선박에 미치는 힘을 작용하도록 한다. 선박은 파도 및 바람과 같은 해양의 영향에 의해 상하 방향 혹은 전후 방향으로 움직일 수 있다. 제안된 장비의 댐퍼는 선박이 갑작스럽게 안벽으로 이동하는 충돌에 대한 위험을 방지하는 역할을 한다. 본 연구에서 댐퍼는 선박의 접근에 대한 완충작용에 대해 단방향성을 갖는 시스템으로 고려한다.

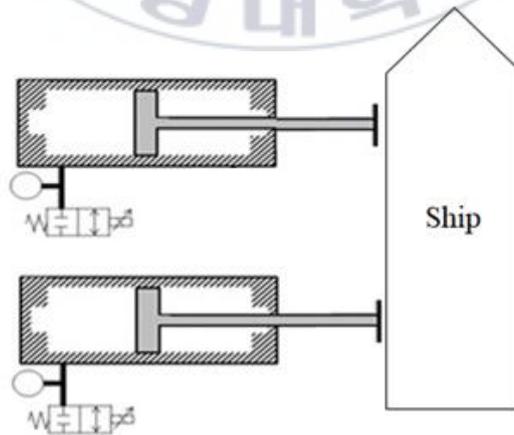


Fig. 2-3 Damper system (one-way control)

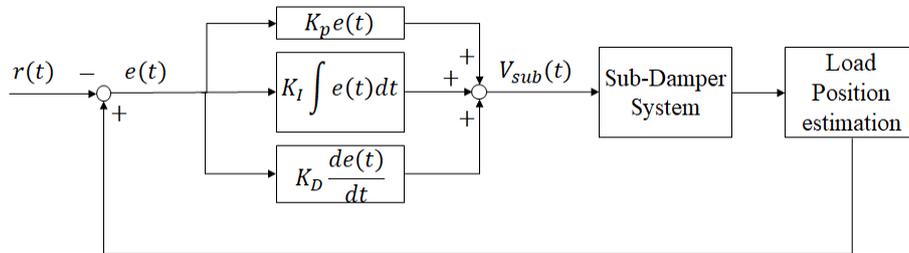


Fig. 2-4 Block diagram of damper control system

Fig. 2-4는 댐퍼에 대한 제어시스템에 대해 나타낸다. 여기서 P 는 비례 제어기, G 는 플랜트(Damper system)를 나타내고 r 은 기준 입력, e 는 기준 입력과 출력간의 오차, y 는 출력을 나타낸다. 선박의 접안 작업 시 선체의 움직임에 영향을 주는 바람 혹은 파도와 같은 외란으로 인해 댐퍼에 허용 압력 이상이 작용할 수 있다. 이때 Fig. 2-4에 표현된 것과 같은 제어계를 접안 작업에 도입하여 선박의 움직임에 의해 주어지는 제안 장비의 댐퍼 압력 값을 입력신호로 인가하고 제어 시스템의 출력이 기준신호를 넘지 않도록 조절한다.

본 연구에서는 다양한 해양 환경에 대한 적응도를 높이기 위해 현장에서 시스템을 구현하기에 용이하고, 사용자가 선박 규모 및 항만 시설의 상황에 따라 쉽게 수정·보완할 수 있는 비례제어기를 도입하였다. 장비에 설정한 제어기의 계수는 제안된 장비로 반복적인 실험을 통해서 적절한 값으로 선정하였다.

원치의 작동은 접안하고자하는 선박이 안벽으로 서서히 이동하도록 선박을 부두 설비 방향으로 적절한 힘으로 당긴다. 이때 선박은 원치의 당기는 힘에 의해 횡방향으로 이동하고 댐퍼의 완충력에 의해 횡방향으로 반발하여 이동한다. 제안된 시스템에서 원치는 횡방향의 기준 경로를 오차 없이

추종해야 하며, 윈치에 사용되는 로프의 장력은 댐퍼의 완충력과 함께 적절한 수준을 유지하여야 한다. 윈치의 로프는 선박의 선수·선미 혹은 대형 선박의 경우 갑판 여러 지점에 결박된다. 윈치 시스템의 특성상 단방향성을 갖는 것으로 고려한다. 상기의 가정은 두개의 액추에이터가 접안 시작부터 완료까지 적정 압력 이상으로 유지된다면 항상 선박에 힘을 작용하기 때문에 유효하다. 연구에 사용된 윈치의 구동계인 모터의 경우, 앞으로의 추가적인 연구에서 다양한 선박의 조건으로 실험할 수 있도록 실험 장치에서 요구되는 사양보다 더 높게 선택하였다.

윈치 시스템의 모델링 과정은 윈치에 외부 압력을 가하였을 때 선박 위치 변화가 윈치의 제어 입력과 어떤 상관관계가 있는지 알아내는 과정이다. 본 연구에서는 실현 가능한 장비로의 연구 진행을 목표로 이론적 분석이 복잡하고 까다로운 수학적 접근이 아닌 실험적 방법을 선택했다.

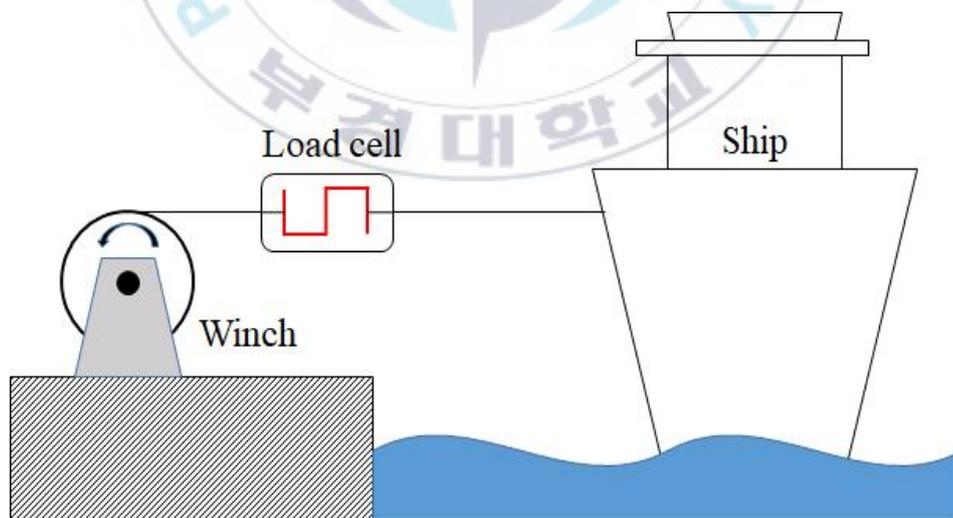


Fig. 2-5 Winch system

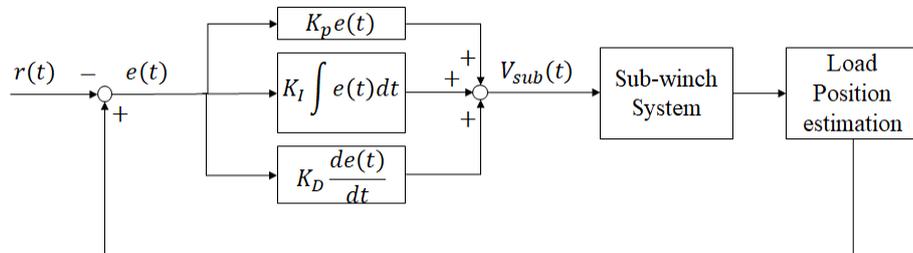


Fig. 2-6 Block diagram of winch system

원치의 제어입력과 선박 위치의 상관관계를 알아내기 위해 Fig. 2-6과 같은 페루프 비례제어계를 구성하였다. 기준입력 30[deg]을 인가하고 시스템 출력을 계측하였다. 비례제어 계수 선정을 위해 정착시간 5초, 오버슈트 0%의 성능을 기준으로 하고 $P=0.05$ 로 설정하였다. Fig. 2-7은 수집된 제어입력을 나타내며, Fig. 2-8은 원치 시스템 출력을 나타낸다. 해당 데이터를 기반으로 Matlab identification tool을 이용하여 전달함수 및 상태방정식을 도출하고 Fig. 2-9과 같이 비교하였다. 즉, Fig. 2-9 그래프에서 실선으로 표시된 data(y1) 값은 원치 시스템의 페루프 응답 곡선을 나타내고, tfe(transfer function estimation) 곡선은 Matlab identification tool을 통해 도출한 전달함수에 Fig. 2-7의 제어입력을 인가한 값이다. SSE(state space estimation)곡선의 경우, 앞선 방법으로 도출한 상태방정식의 응답 곡선이다.

본 연구에서는 원치 로프가 선박에 고정된 상황에서 선박이 접안 기준 경로를 오차 없이 추종할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 제어대상의 스텝 상의 외란이나 변동에 의해 발생하는 제어 오차가 정상상태에서 0으

로 되도록 하는 적분형서보계를 도입한다. 앞에서 도출한 윈치 시스템은 Fig. 2-8처럼 나타낼 수 있다.

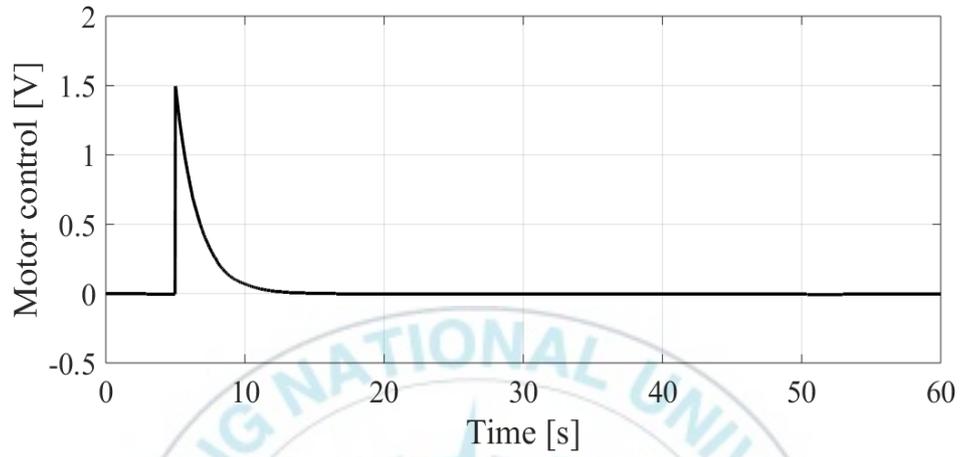


Fig. 2-7 Winch motor control input

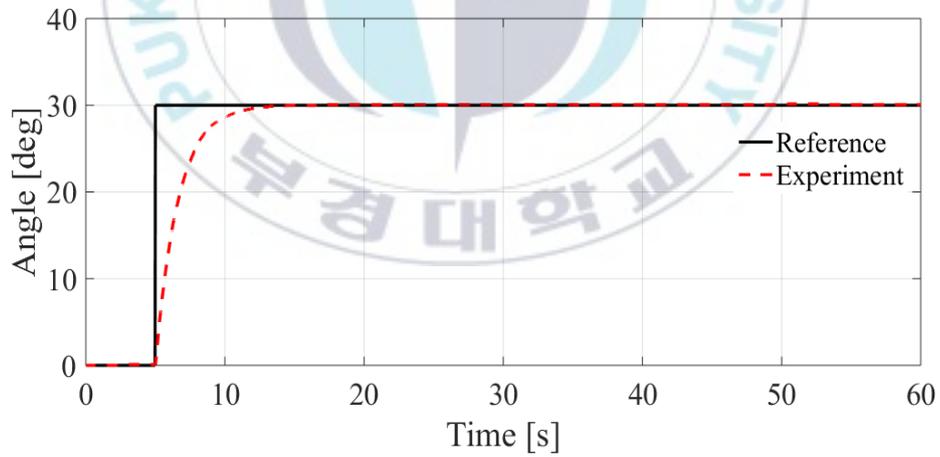


Fig. 2-8 Winch drum angle

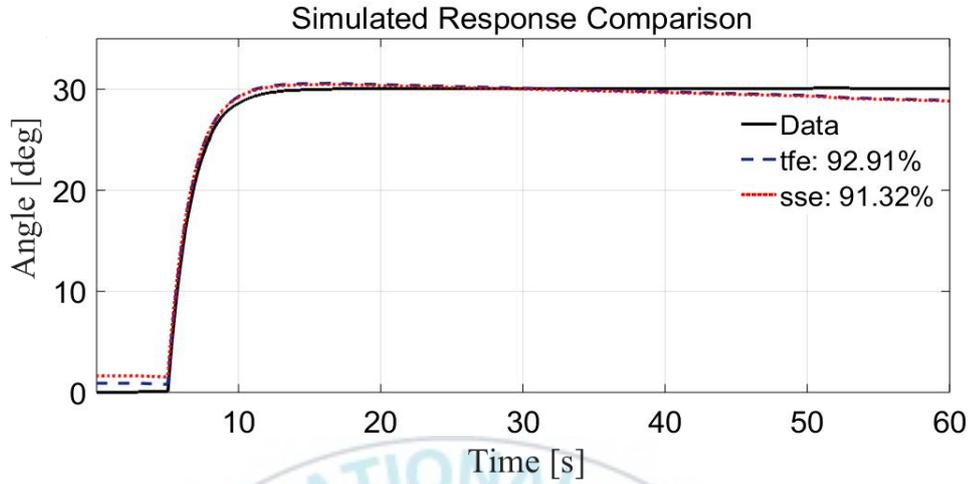


Fig. 2-9 Winch simulation response comparison

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\begin{cases} A = -4.389e-11, B = 11.71, \\ C = 1, D = 0 \end{cases} \quad (2-8)$$

실험에서 출력값을 Matlab을 사용하여 동정하는 방식으로 전달함수를 구하였다. 이를 통해 적분형서보계를 설계하기 위한 새로운 변수 $z_i = [x \ x_i]^T$ 을 도입하였다. x_i 는 적분기를 지난 오차 신호를 의미한다. 따라서 적분형서보계의 상태방정식은 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= A_i z_i + B_i u_i \\ y &= C_i z_i \end{aligned} \quad (2-9)$$

여기서,

$$A_i = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_i = [C \ 0]. \quad (2-10)$$

이다.

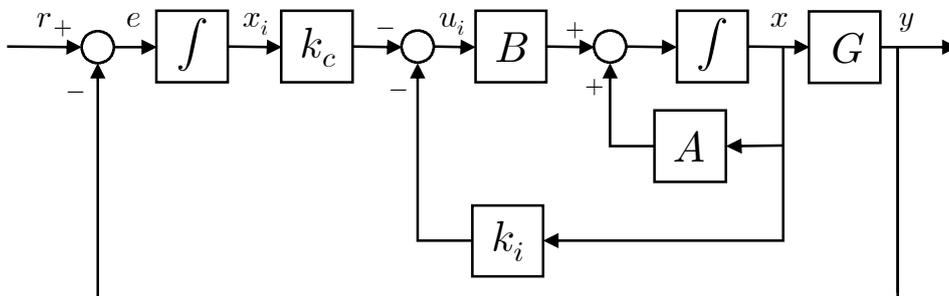
식 (2-9)의 (B_i, A_i) 조가 제어 가능이라면, 이 시스템이 안정하도록

$$u_i = -kz_i = -[k_i \ k_c][x_i \ x]^T \quad (2-11)$$

의 형태를 갖는 상태피드백을 선택한다.

적분형서보계의 기본적인 블록선도는 Fig. 2-10과 같다.

$(A_i - B_i k)$ 을 안정하게 하는 게인 값 $[k_i \ k_c]$ 은 극 배치 기법을 사용하여 선정했다. 적분형서보계의 설계 과정에서 시스템 성능 기준은 원치시스템 모델링 과정과 동일하게 적용하였다.



따라서 시스템 극값은

$$\begin{cases} p_1 = -6 \\ p_2 = -8 \end{cases} \quad (2-12)$$

로 선정하였고, 이에 따라 계산된 피드백 게인 값은 다음과 같다.

$$k = [k_i \ k_c]^T = [1.1956 \ -4.0991]^T \quad (2-13)$$



2.3 능동형 선박 접안 시스템 모형실험장치 구성

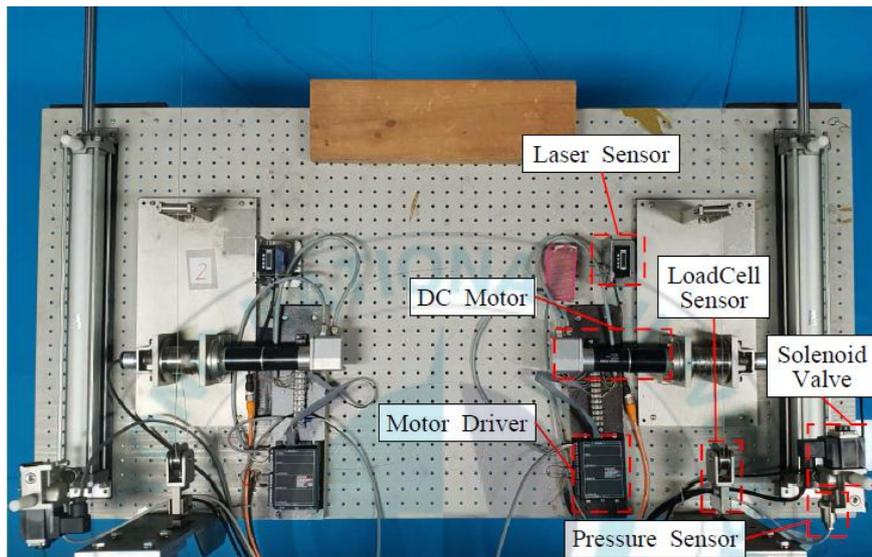


Fig. 2-11 Configuration of experiment system

Fig. 2-11을 보면 본 연구에서의 제안된 장치의 모형실험을 위해 사용된 장치는 총 여섯 가지다. 윈치를 구동하는 동력으로는 DC 모터를 사용하였으며 모터 드라이버와 연동하여 DC 모터에 적절한 전압을 인가하여 회전력을 제어할 수 있도록 하였다. 실린더는 선박이 육상 쪽으로 접근할 때 일정한 속도를 유지할 수 있도록 윈치 로프의 당기는 힘과 반대 방향으로만 힘을 주도록 설계하여 선박의 접안 속도를 완충하는 역할을 할 수 있도록 설계하였다. 선박이 접안됨에 따라 실린더 내부에 인가되는 압력을 조정하여 접안되는 선박의 속도가 제어되도록 구성하였으며, 그 압력을 측정하는 압력 센서를 사용하였다. 압력 센서를 통해 전달된 데이터를 연동하여 실린더 내부 압력을 제거하는 밸브의 개폐량을 조절하여 실린더 내부의

압력과 움직임을 조절하였다. 이 밸브는 비례제어 밸브를 사용하였다. 선박이 접안되는 위치 계측은 항구모형인 실험 장치에 고정된 레이저 센서를 활용하였다. 선박에 주어지는 외력인 윈치의 로프 장력은 로드셀 센서를 사용하여 실험장치를 구성하였다.

모형실험 장치에서의 계측값과 장비들의 제어는 Fig. 2-12에 표현한 것처럼 데이터수집장치(DAQ Board)의 세 가지의 입력데이터(Laser sensor, Load sensor, Proportional valve)와 두 가지의 출력데이터(Proportional valve, DC motor)를 사용하도록 구성하였다. 실험장치 간의 데이터 교환과 조작은 컴퓨터의 소프트웨어를 사용하고 있으며 이는 데이터수집장치와 연동되어 구성하였다. 데이터수집장치는 각 센서로부터 아날로그 신호의 입력신호를 받아 디지털 신호로 변환하고, 컴퓨터로 확인할 수 있도록 하였다. 컴퓨터의 소프트웨어는 전달받은 디지털 출력 신호를 드라이버에 전달하는 역할을 한다. 디지털 신호를 입력으로 전달받은 드라이버는 DC 모터와 댐퍼의 실린더 비례제어 밸브에 적절한 전압을 인가하여 선박의 접안이 제어될 수 있도록 하였다.

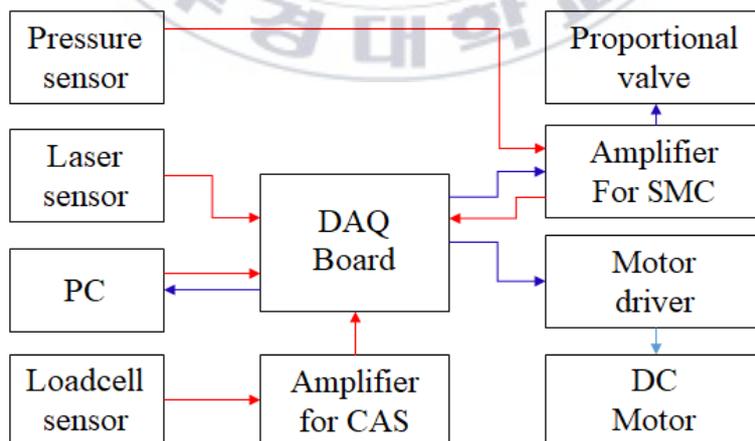


Fig. 2-12 Data path between test model equipment

Table 2-2 Specification of DC motor

DC motor (model: maxon motor 484391)	
Nominal voltage	24[V]
No load speed	7580[rpm]
Max. continuous torque	177[mNm]
Max. permissible speed	6940[rpm]
Terminal resistance	0.299[Ω]
Terminal inductance	0.082[mH]
Torque constant	30.2[mN·m/A]
Speed constant	317[rpm/A]
Speed/torque gradient	3.14[rpm/mN·m]



Table 2-3 Specification of DC motor controller

DC motor controller	
Nominal operating voltage + V_{cc}	10~50[V]
Sampling rate PI current controller	53.6[kHz]
Sampling rate PI speed controller	53.6[kHz]
Analog input	resolution 12-bit -10~+10 [V] differential
Digital input	+2.4~36 VDC ($R_i=38.5[kΩ]$)
Speed	full speed (12[Mbit/s])



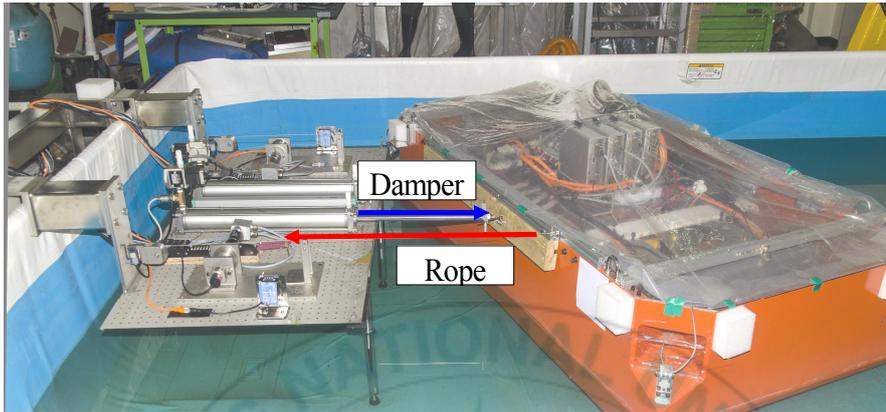
Table 2-4 Specification of pressure sensor

Pressure sensor (model: PSE-560)		
Rated pressure range	0 ~ 1 MPa	
Repeatability	±0.2 %(F.S.)	
Supply voltage	12 ~ 24 VDC	
Analog output	1~5 V 10 mA max	
Output impedance	Approx. 1kΩ	
Proof pressure	1.5 MPa	

Table 2-5 Specification of Laser distance sensor

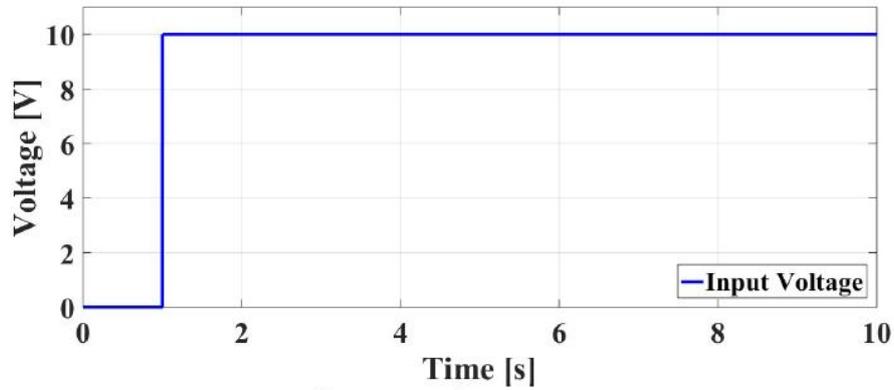
Laser sensor (model: OD-1000)		
Reduction ratio	1/60	
Axial module	2.5	
Lead angle	3.87[deg]	
Pressure angle	20[deg]	
Backlash	0.14[deg]~0.27[deg]	
Mounting distance	93.5[mm]	

2.4 능동형 선박 접안 시스템의 동특성 분석

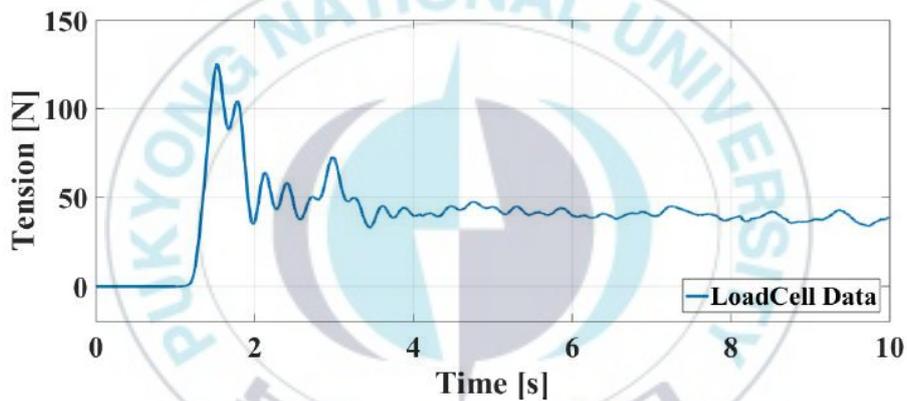


제안된 능동형 선박 접안 시스템의 제어는 DC 모터의 회전력 제어를 통해 선박과 연결된 로프의 장력 제어로 이루어진다. 윈치의 역할인 DC 모터의 회전은 드라이버로부터 전달되는 인가전압으로 구동되며, 감속기를 거쳐 회전력이 발생한다. 이때 발생한 회전력은 선박을 육상 측으로 끌어당기며 로프에 걸리는 장력으로 작용하고 선박의 움직임은 이 장력에 따라 제어된다. 선박이 접안되는 과정의 시뮬레이션을 통한 제어이득을 찾기 위해서는 DC 모터의 제어값인 인가전압과 이때 발생하는 움직임으로 인해 로프에 걸리는 장력 사이의 전달함수 도출이 필요하다.

선박 모형을 Fig. 2-13과 같이 댐퍼 실린더의 끝 지점에 위치하게 하고 DC 모터에 전압을 인가하여 로프에 걸리는 장력을 로드셀로부터 측정하여 데이터를 수집하였다. 수집 시간은 0.001초 간격으로 총 10초간 데이터를 수집하였으며, 다음 실험을 고려하여 실린더의



(a) Input Voltage to motor



(b) Output tension from loadcell sensor

Fig. 2-14 Motor applied voltage and output (rope tension) for transfer function identification

비례 제어 밸브는 1.8v[V]를 인가하여 일정 개도로 개방된 상태를 유지하였다.

Fig. 2-13의 모터 인가전압은 실험 개시 1초 이후 10[V]으로 입력되었으며 이때 작동한 모터로부터 전달된 회전력은 로프에 순간적으로 대략 130[N]까지 급상승하였으나 점차 50[N]으로 내려와 일정하게 유지하는 것을 확인할 수 있다. 모터에 전압이 인가되고 약 0.25초의 짧은 시간 동안에

는 로프의 장력이 0[N]의 값을 유지하는 것으로 계측된 것은 실험 전 느슨한 상태로 대기 중이었던 로프가 당겨지며 선박에 힘을 전달하는데 소요된 시간임을 확인할 수 있다.

실험을 통해 10초간 수집된 데이터는 입력과 출력으로 구분하여 Matlab Identification Tool을 이용하여 구해본 전달함수는 식 (2-14)으로 나타난다. 전달함수의 극점은 3개, 영점의 수는 2개이며 로드셀로부터 전달된 계측 그래프와는 68.6%의 일치율을 보인다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{u(s)} = \frac{-34.72s^2 + 296.3s + 125.1}{s^3 + 4.75s^2 + 39.77s + 32.4} \quad (2-14)$$

Fig. 2-15에서 확인되는 것과 같이 도출한 전달함수의 출력값과 실험으로 얻은 데이터에서 모터에 전압이 인가되는 시점 이후 약 0.25초의 짧은 시간 동안 음수값이 나타나는 것은 앞서 언급한 것과 같이 실험 전 느슨해진 로프에 장력이 없어 로드셀의 계측값에 변화가 없기 때문으로 추정된다. 그 외에 로드셀 센서의 특성상 계측값에 노이즈가 쉽게 나타나는 점을 고려한다면 전체적인 모습은 상당히 실험값과 유사한 것으로 판단할 수 있다. 식 (2-14)의 전달함수를 이용한 실제 제어기의 설계는 다음 장의 모형 실험을 통해 최종 제어이득을 구하였다.

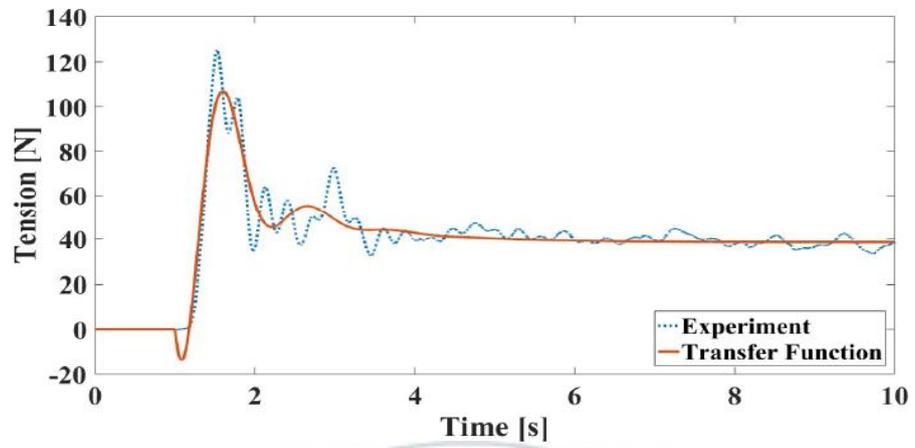
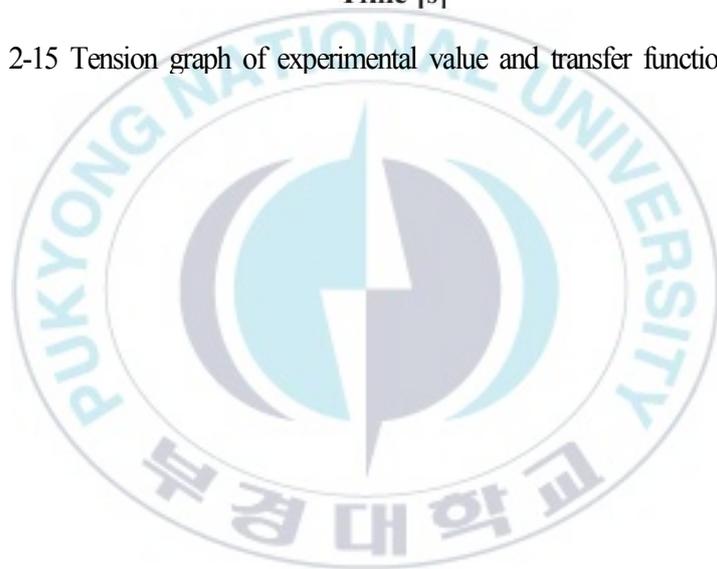


Fig. 2-15 Tension graph of experimental value and transfer function output



제 3 장 모형 실험 장치의 제어기 설계

3.1 서론

설계된 제어기의 유효성을 판단하기 위해서는 상용화된 제어기와 제안하고자 하는 제어기 두 개의 비교 분석이 필요하다. 본 연구의 제어기 설계는 아래의 조건으로 설정하여 PID 제어기와 Sliding Mode 제어기 두 가지를 설계하였다. 그리고 Matlab Simulink를 이용하여 다음의 성능을 만족하는 1차 제어이득을 선정한다.

- 1) 목표값으로의 도달속도 신속성
- 2) 목표값으로의 정상 편차가 5% 이내일 것
- 3) 목표값으로의 오버 슈트가 10% 이내일 것

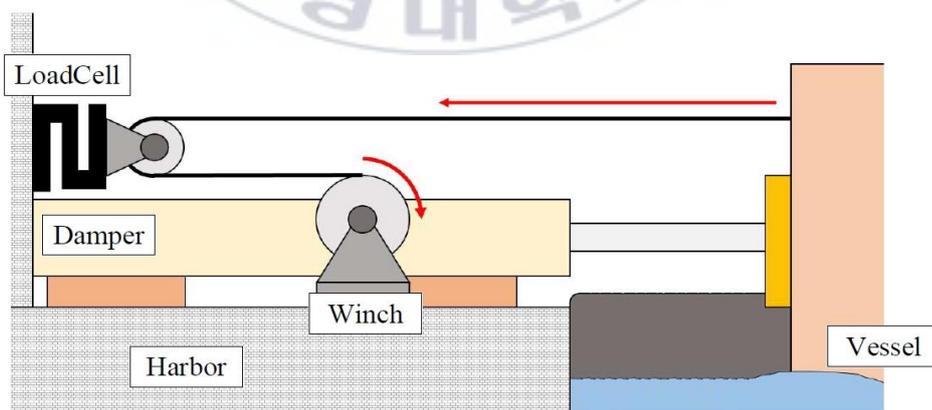


Fig. 3-1 Schematic diagram for experimental equipments

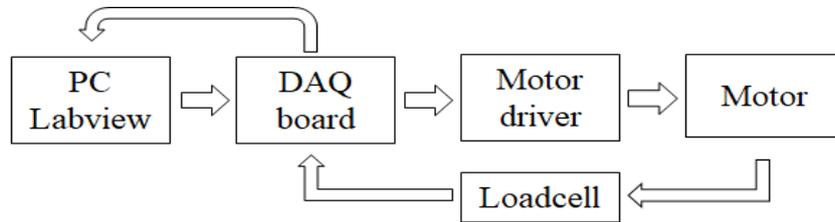


Fig. 3-2 Signal flow diagram of control system

선정된 제어이득은 실제 시스템에 적용하여 더 나은 응답성을 가질 수 있도록 조절하여 최종 제어이득을 선정하도록 하였다. 적절한 제어이득을 찾기 위한 방법으로 Fig. 3-1에 표현한 것과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실린더 행정 끝 지점에서부터 욱상으로 선박이 접안된 실린더 행정의 가장 가까운 지점까지의 계측값을 확인해보았다.

Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였지만, 시험 장치는 NI(National Instrument)사에서 제작된 데이터수집장치를 사용하였다. 시뮬레이션과 실험장치 간의 호환성을 고려하여 Labview를 소프트웨어로 선정하였으며, 실험장치의 데이터 전달 흐름은 Fig. 3.2와 같이 설계하였다.

Labview에서 설정된 동작 신호가 DAQ로 전달되면 Motor driver를 통해 인가전압이 모터로 전달되고 모터는 윈치의 역할을 하며 로프에 장력이 주어진다. 이때 발생한 장력은 Load cell을 통해 계측하고 이 데이터는 다시 DAQ로 전달되어 Labview로 보내진다. 신호를 받은 Labview는 다시 제어입력을 생성하여 DAQ로 전달된다.

PID 제어기는 오랜 기간 사용되어 그 성능이 검증된 제어기로 산업계에 사용되는 제어방식의 80%가 PID 제어기를 사용하는 것으로 알려져 있다. 제어기의 설계가 매우 간단하고 부하 변동에 대한 만족할 만한 응답 특성을 보여주는 것이 특성이다. 가장 널리 이용되는 PID 제어기는 Fig. 3-3에 나타난 것과 같이 표현된다.

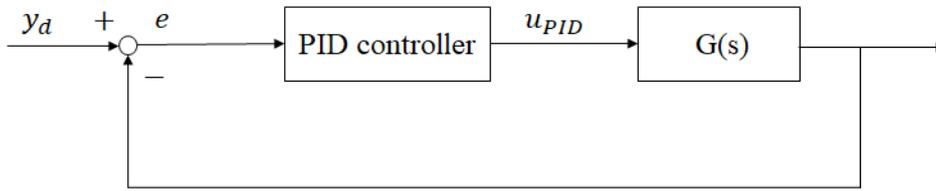


Fig. 3-3 Block diagram of PID control system

목표값을 y_d , 출력값을 y 라고 할 때, 오차 신호 $e(t)$ 는 다음 식과 같이 나타난다.

$$e(t) = y_d - y \quad (3-1)$$

강인제어(Robust Control)의 제어 방법 중 가장 대표적인 Sliding Mode 제어기는 모델링이 불완전하여 제어 대상의 불확실성이 있을 때 사용되는 방법이다. Sliding Mode 제어기는 목표값과 계측값 사이의 오차를 0으로 만드는 과정에서 불연속적인 Signum 함수를 사용한다. 해당 제어기의 불연속성 때문에 제어입력과 상태벡터에 채터링 현상이 나타나는 것이 특징이다. 본 연구에서 제안하는 선박 접안지원 시스템의 제어기로 Sliding Mode 제어기를 사용하기 위해 해당 제어기의 일반적인 형태를 표현하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$\dot{x} = f(x,t) + g(x,t)u \quad (3-2)$$

여기서, $x \in R^n$ (상태변수 x 는 n 차원의 벡터)는 시스템에서 상태벡터이고, $f \in R^n, g \in R^n \times R, u \in R$ 는 시스템에 인가되는 제어입력이다. 가변구조 제어기는 다음과 같은 두 단계의 설계 방법으로 표현할 수 있다.

1) 요구하는 특성을 갖는 슬라이딩 평면설계

$$S = x \in R^n \mid s(x) = 0 \quad (3-3)$$

2) 시스템에서 상태벡터들을 슬라이딩 평면상에 위치하도록 제어입력 구성

$$u = \begin{cases} u^+(x) & \text{when } s(x) > 0 \\ u^-(x) & \text{when } s(x) < 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

제어대상에서 슬라이딩 모드가 일어나면 시스템은 매개변수 불확실성과 외란에 둔감하게 된다. 이때, 상태를 슬라이딩 평면에 도달하게 하는 조건을 결정하는 것이 중요하다. 이러한 조건을 도달 조건(Reaching condition)이라 부른다. 도달조건을 구하기 위해서는 다음과 식과 같은 Lyapunov function candidate를 정의할 수 있다.

$$V(x,t) = \frac{1}{2}s^2(x) \quad (3-5)$$

여기서 $s(x)$ 는 스위칭 함수이고, $x \in R^n$ 는 시스템상의 상태 벡터이다. Sliding Mode 제어를 존재하게 하는 제어 도달조건은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{V}(x,t) = s(x)\dot{s}(x) < 0 \quad \text{for } x \in R^n - S \quad (3-6)$$

일반적으로 가변구조 제어시스템의 동특성은 도달 모드와 슬라이딩 모드로 이루어진다. 원하는 슬라이딩 모드 제어설계에 있어서 중요한 부분이 도달조건을 만족하는 제어입력을 선정하는 것으로 도달 모드를 설계할 때에는 요구하는 시스템의 동특성뿐만 아니라 슬라이딩 모드를 도출할 수 있는 제어입력을 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 다음 식과 같은 도달 법칙을 많이 사용한다.

$$\dot{s}(x) = -K \operatorname{sgn}(s), \quad K > 0 \quad (3-7)$$

여기서 목표값으로 수렴하는 속도는 스위칭 이득 K 에 의해 결정된다. 스위칭 함수 $s(x)$ 를 식 (3-2)의 궤적에 따라 시간에 대해 미분하면 아래의 (3-8)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u = -K \operatorname{sgn}(s) \quad (3-8)$$

식 (3-8)을 제어입력 u 에 대해 정리하면 다음의 식이 유도된다.

$$u = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial x} f(x) + K \operatorname{sgn}(s) \right] = u_{eq} + u_s \quad (3-9)$$

여기서 u_{eq} 는 등가 제어입력이고, u_s 는 가변 제어입력이다. 보통 $s(x)$ 는 소멸시켜야 할 오차항들의 합으로 설정한다. 그런데 오차항을 설정할 때, 식(3-9)의 $\left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]$ 항이 역행렬로 존재하도록 설정해 주어야 한다. 이것

이 s 설정의 조건이 된다.

또한, 슬라이딩 면에서 채터링(Chattering, 진동 현상)을 제거해주기 위해 평활화 항을 추가할 수 있다. 일반적으로 제어이득 K 를 작게 하면 채터링이 감소한다. 시스템 궤적이 슬라이딩 평면에 거의 도달하면 채터링 현상을 줄이기 위하여 가능한 제어이득 K 를 작게 한다. 그럼에도 불구하고 제어 상태가 슬라이딩 면에서 멀리 떨어져 있는 경우에는 빠르게 슬라이딩 면에 도달시키기 위해 K 값을 크게 선정하기 위한 퍼지 규칙을 선정하기도 한다.



3.2 PID 제어기 설계

PID 제어기는 앞서 설명한 것과 같이 널리 사용되는 제어기로 설계가 간단하고 만족할만한 응답속도를 보이는 이점이 있다. Fig. 3-3과 같은 일반적인 PID 제어기를 이용하여 추종하고자 하는 목표값을 y_d , 출력값을 y 라고 할 때, 오차 신호 $e(t)$ 에 대한 식 (3-1)을 이용할 수 있다. 이때, 오차 신호 $e(t)$ 에 의해 PID 제어기가 제어입력을 생성한다. 생성된 제어입력을 u_{PID} 라고 할 때, 제어입력을 수식으로 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$u_{PID} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3-10)$$

식 (3-10) 에 표현된 것처럼 제어입력 u_{PID} 는 각각 K_p , K_i , K_d 의 제어이득을 포함한다. 제어이득을 도출하기 위해서 Matlab Simulink 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서 설정한 제어기 설계조건을 만족하기 위한 제어이득은 $K_p = 0.0572$, $K_i = 0.2125$, $K_d = 0.0005$ 로 확인하였다.

이러한 시뮬레이션을 바탕으로 도출한 결과를 바탕으로 제어시스템을 구성하고 실험 장치를 통한 계측값을 사용하여 제어이득을 설계조건에 맞도록 조절하였다. 실험 상황을 고려하여 목표값은 $120 + 20 \sin(10t)$ 로 설정하였다.

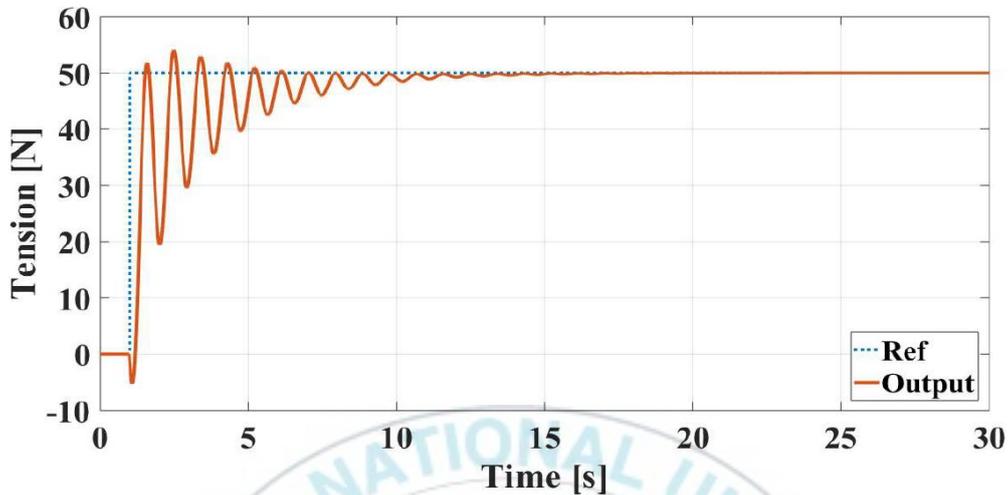


Fig. 3-4 Simulation result with PID-controller

Fig. 3-5 는 모형실험 선박의 선수와 선미 측에 설치된 두 선박 지원시스템의 로드셀로부터 계측한 값을 나타낸 것이다. 2번 시스템의 경우 계측 시작 직후 장력 계측값에서 지연이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 초기값을 0으로 하기 위해 실험 개시 전 로프를 느슨하게 한 상태로 대기한 것을 원인으로 확인할 수 있다. 2번이 1번보다 상대적으로 로프가 더 느슨한 상태를 유지하여 계측값에 시간지연이 발생된 것으로 파악된다. 시뮬레이션의 결과는 선박이 접안하는 과정에서의 전달함수를 이용해 결과를 도출하였다. 그리고 실험 장치를 이용한 경우에는 선박을 장치에 최대한 접근시킨 상태에서 실험을 개시했다. 이러한 이유로 시뮬레이션보다 실험장치를 이용한 접안의 도달시간이 확실히 빠른 것이 확인되었다.

실험을 통해서 얻은 값을 기준으로 제어기 설계조건을 고려하여 최종적으로 얻어진 PID 제어기의 제어이득은 다음과 같이 도출되었다.

$$K_p = 0.22067, K_i = 0.00559, K_d = 0.00014 \quad (3-11)$$

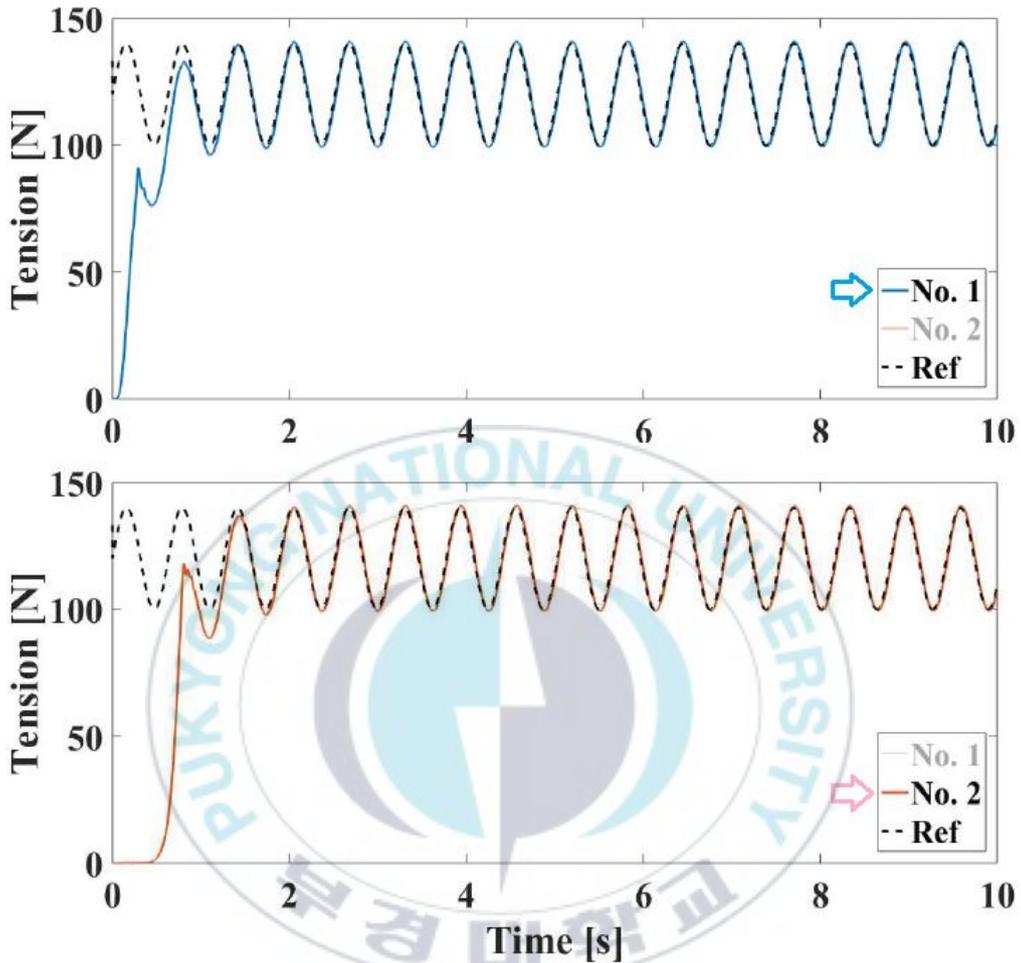


Fig. 3-5 Tension tracking experiment result with PID control system

실험을 통해 도출된 K_p 의 경우 선정된 값보다 높아지면 응답시간이 빨라지는 이점이 있지만, 정상상태에서의 진동이 크게 발생하는 불안정한 현상이 발생하여 설계조건에 부합되지 않는 것을 확인할 수 있었다. K_i 값이 0으로 조정할 경우, 도달시간에는 큰 차이가 없었지만 정상 편차가 발생하는 것이 확인되었다. K_i 를 선정된 값보다 높일 경우, 도달속도가 느려지는 현상이 나타나 응답성이 떨어지는 것을 확인하였다. K_d 의 경우에는 제어

초반 부분의 응답성을 개선하기 위해 높여보려고 조정해 보았으나 채터링이 발생하였고, 0일 경우에는 정상상태에서도 진동이 발생하여 응답성이 떨어짐을 확인하였다. 선정된 값으로 설계한 PID 제어식은 다음과 같이 표현된다.

$$u_{PID} = 0.22067 e(t) + 0.0059 \int_0^t e(\tau) d\tau + 0.00014 \frac{de(t)}{dt} \quad (3-12)$$



3.3 Sliding Mode 제어기 설계

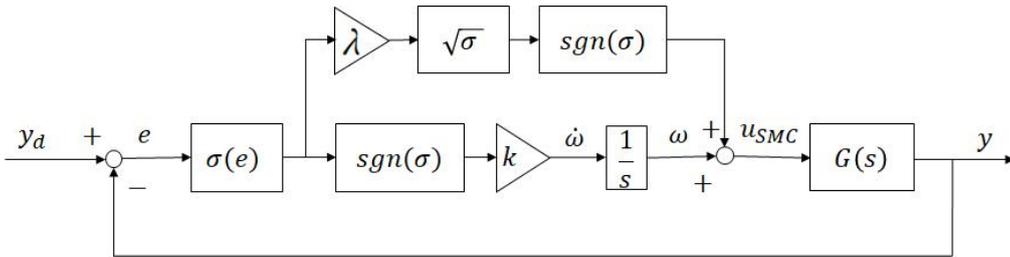


Fig. 3-6 Block diagram for Sliding Mode Controller

Sliding Mode 제어기는 앞서 알아본 것처럼 강인 제어 분야의 대표적인 제어 방법이다. 본 연구에서의 선박 접안 시스템의 제어는 Sliding Mode 제어기 중에서도 외란 억제 성능과 추종 성능이 우수하다고 알려진 슈퍼-트위스팅 알고리즘(Super-twisting algorithm)을 적용한 Sliding Mode 제어기를 선정하였다. Sliding Mode 제어기의 설계를 위해 목표값과 제어값의 오차 e 를 사용하여 Sliding 변수 $\sigma(e)$ 를 선정하였다.

$$\sigma(e) = \ddot{e} + G_1 \dot{e} + G_2 e \quad (3-13)$$

식 (3-13)에서 Sliding 변수 $\sigma(e)$ 는 두 가지 제어이득 G_1 과 G_2 를 포함하고 있다. 오차 신호 e 를 0으로 만들기 위해 사용되는 Signum함수 $sgn(\sigma)$ 를 식으로써 표현하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$sgn(\sigma) = \frac{\sigma}{|\sigma|} \quad (3-14)$$

제어입력으로 u_{SMC} 를 수식으로 나타내기 위하여 w 를 수식으로 표현해보면 다음과 같다.

$$\omega = \int_0^t k \operatorname{sgn}(\sigma) d\sigma \quad (3-15)$$

Sliding mode 제어기에 의해서 전달함수 $G(s)$ 로 입력되는 시스템의 제어입력 u_{SMC} 은 다음의 수식으로 표현된다.

$$u_{SMC} = \lambda \sqrt{\sigma} \operatorname{sgn}(\sigma) + \int_0^t k \operatorname{sgn}(\sigma) d\sigma \quad (3-16)$$

입력 제어 수식을 살펴보면 λ 와 k 의 두 가지 제어이득이 포함된 것을 확인할 수 있다. 따라서 식 (3-13)와 식 (3-16)에서 확인된 것처럼 Sliding Mode 제어기에서 선정되어야 하는 제어이득은 G_1 , G_2 , λ , k 의 네 가지가 있다.

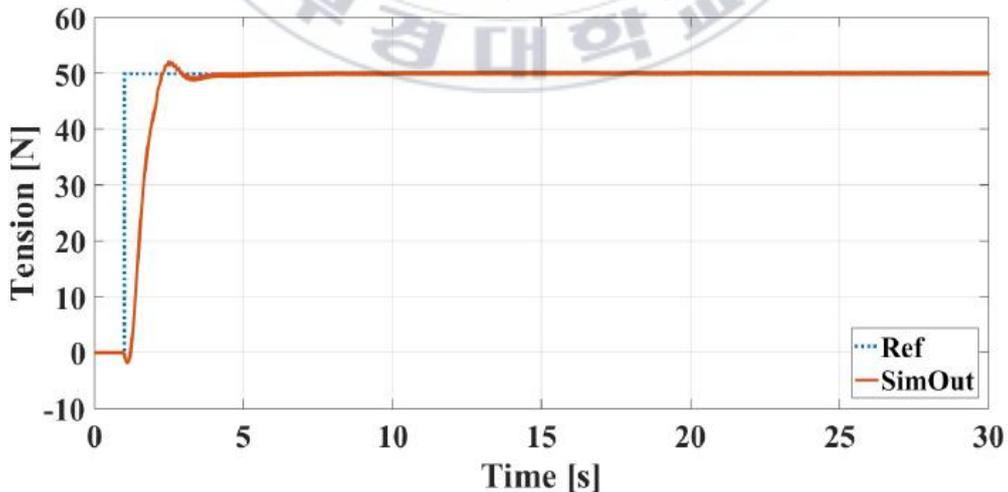


Fig. 3-7 Simulation result with Sliding Mode controller

Fig. 3-6에 표현된 Sliding Mode 제어기의 블록 다이어그램을 참고하여 Matlab Simulink를 이용한 제어시스템을 구성하고 시뮬레이션을 통한 제어기 설계조건을 만족하는 적절한 제어이득을 선정해 보았다. 앞선 PID 제어기 설계 방식과 같이 계단형식의 목표값을 사용하여 결과를 검토하였다. Fig. 3-7의 결과를 살펴보면 Sliding Mode 제어기는 PID 제어기로 제어될 때보다 불필요한 진동이 없고 빠르게 목표값에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이때의 제어이득은 $G_1 = 20.6682$, $G_2 = 4.0092$, $\lambda = 0.7512$, $k = 6.1977$ 로 확인된다.

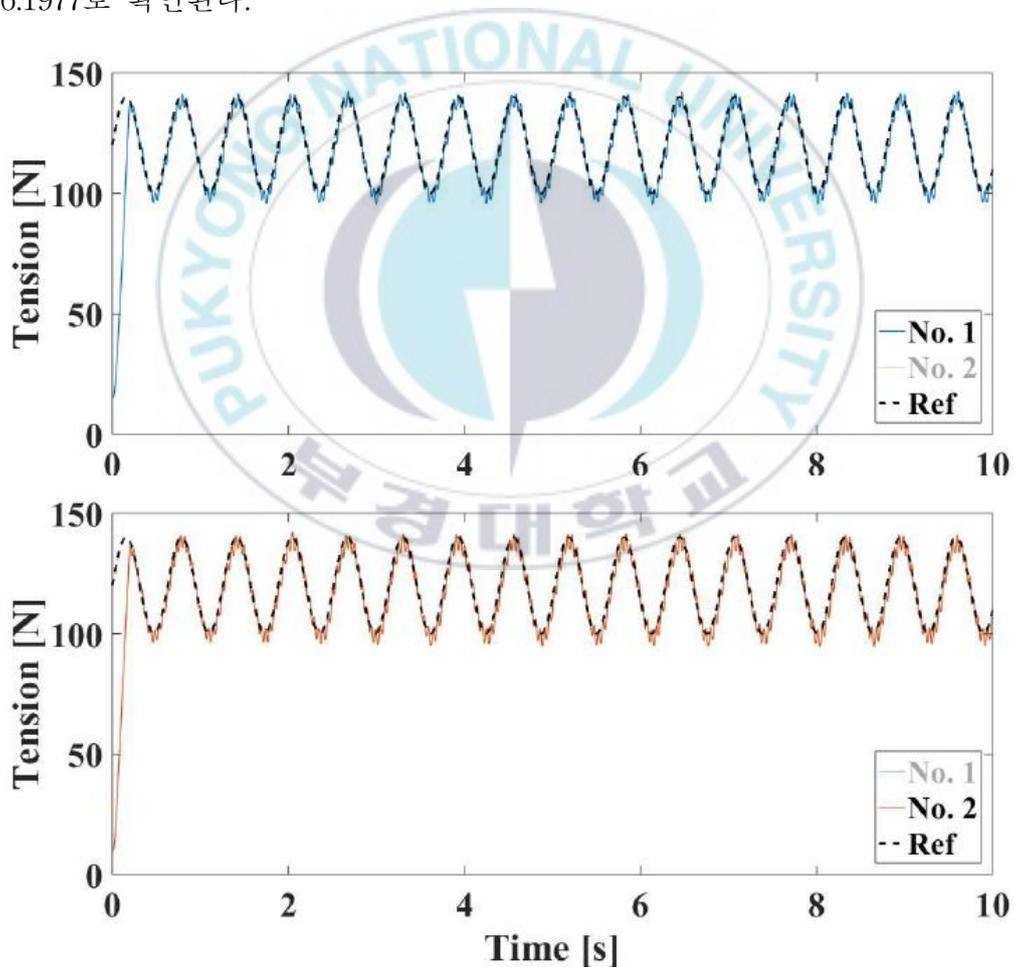


Fig. 3-8 Tension tracking experiment result with Sliding Mode controller

시뮬레이션을 통해 선정된 제어이득을 바탕으로 실험장치를 이용한 검증 방법으로 제어이득을 조절해보았다. 목표값은 PID 제어기의 제어이득을 조절할 때와 동일하게 $120 + 20 \sin(10t)$ 를 사용하였다.

Fig. 3-8의 결과를 검토해보면, 시뮬레이션에 비해 목표값 도달시간이 짧아진 것을 확인할 수 있다. 또한 결과를 정밀하게 분석해보면 미세한 정상 편차가 발생한 것을 확인할 수 있으나 오버슈트 현상은 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 Sliding Mode 제어기의 성능이 전체적으로 매우 우수한 응답성을 보이는 것으로 판단할 수 있다.

실험장치에서의 결과를 바탕으로 제어이득을 검토한 결과, G_1 값이 작은 경우에는 제어입력의 채터링 현상이 발견되지 않았다. 또한 정상 편차도 거의 없는 결과가 나타났다. 하지만 도달속도가 매우 느려 제어기 설계조건이 부합하지 않음을 확인할 수 있었다. 목표값과 계측값의 차이가 큰 상황에서는 모터에도 최대 인가전압인 10[V]에 반 정도밖에 안 되는 값이 인가되고 있는 것을 확인하였다. 반면 G_1 값이 커지게 되면 정상 편차가 발생하는 것을 확인하였다.

목표값과 계측값의 오차가 큰 경우에 10[V]의 인가전압 최대치가 인가되도록 G_1 을 선정하였으며 이로 인해 발생하는 정상 편차를 조정하기 위해 G_2 를 증가시켜보았다. G_2 의 제어이득이 증가함에 따라 제어입력의 채터링 폭이 커지면서 개선되는 것을 발견할 수 있었다. 모터에는 최대 인가 전압에 한계치가 있으므로 G_1 과 G_2 의 제어이득을 무한히 늘릴 수는 없다. 제어이득 λ 는 채터링 현상을 감쇠하는 역할을 하고 값이 0인 경우에는 도달 시간도 늦어지며 정상 편차가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 제어이득 k 값을 증가시키면 목표값으로의 도달시간을 더 줄일 수 있었지만, 오버슈트가 커져 설계조건을 만족하는 범위에서 그 값을 선정하였다. 선정된 제어

이득은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_1 = 100, G_2 = 2037, \lambda = 0.2236, k = 0.05 \quad (3-17)$$



제 4 장 모형 실험 및 결과

4.1 선박 접안 모형 실험

앞장에서 PID 제어기와 Sliding Mode 제어기 설계를 위한 각각의 제어 이득을 선정하였다. 이번 선박 접안 모형 실험에서는 설계한 제어기의 성능 확인을 위해 선박에 외력을 가하여 접안이라는 목표값과 그 과정에서의 계측값의 오차를 발생시켰다. 이때 목표값을 추종하는 제어 성능을 확인하고자 한다. 실험 초기 조건은 아래와 같다.

- 1) 능동형 실린더 펜더의 행정 끝에서 선박 접안 개시
- 2) 능동형 실린더의 압축공기 제어 밸브 폐쇄
- 3) DC 모터와 연결된 로프의 장력 목표값 120[N]으로 설정

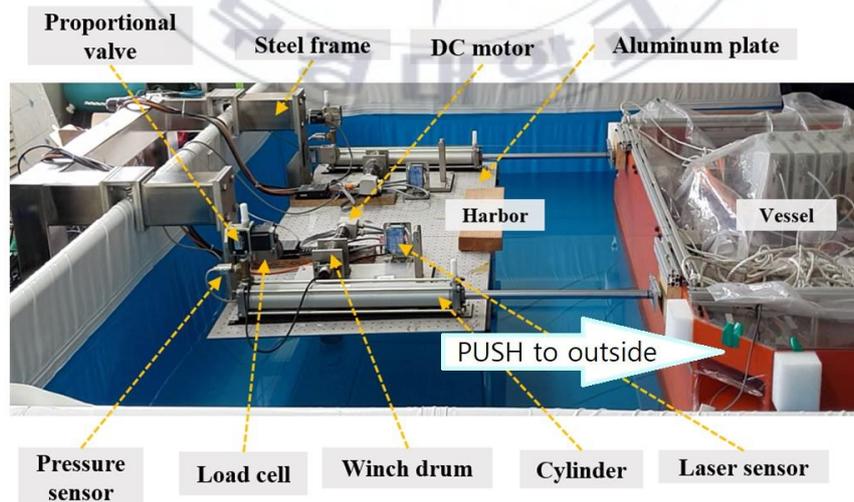


Fig. 4-1 Method of experiment

선박이 접안이 완료되는 시점인 목표값 도달한 상태에서 능동형 실린더 팬더의 압축력도 멈추게 되는데 이 상태에서 외력이 작용할 경우의 변화도 관찰하였다.

Fig. 4-2는 PID 제어기와 Sliding Mode 제어기를 각각 적용하여 실험한 로프의 장력유지실험 결과이다. 선박이 육상으로 접근하는 과정 중에 불규칙적으로 외력을 임의로 작용시켰으며, 실린더가 완전히 압축되어 접안이 완료된 상태에서도 불규칙적으로 외력을 3회 작용하였다. 선박이 정지된 이후에 주어진 외력으로 인해 로프의 장력이 순간적으로 높아지고, 일정한 장력 유지를 위해 모터가 로프를 푸는 방향으로 회전하도록 전압이 인가되는 것을 확인할 수 있었다. 선박이 외력으로 밀려난 이후에는 다시 목표값을 추종하기 위해 실린더를 압축시키며 로프의 장력을 높이는 방향으로 모터에 인가전압이 들어가는 것도 확인할 수 있었다.

설계한 두 제어기를 적용한 실험결과를 비교해보면 목표값을 추종하는데 있어서 차이가 있음을 확인할 수 있다. PID 제어기의 경우 외력이 작용한 이후 로프의 장력이 증가하였다가 감소된 장력을 일정하게 유지하는 과

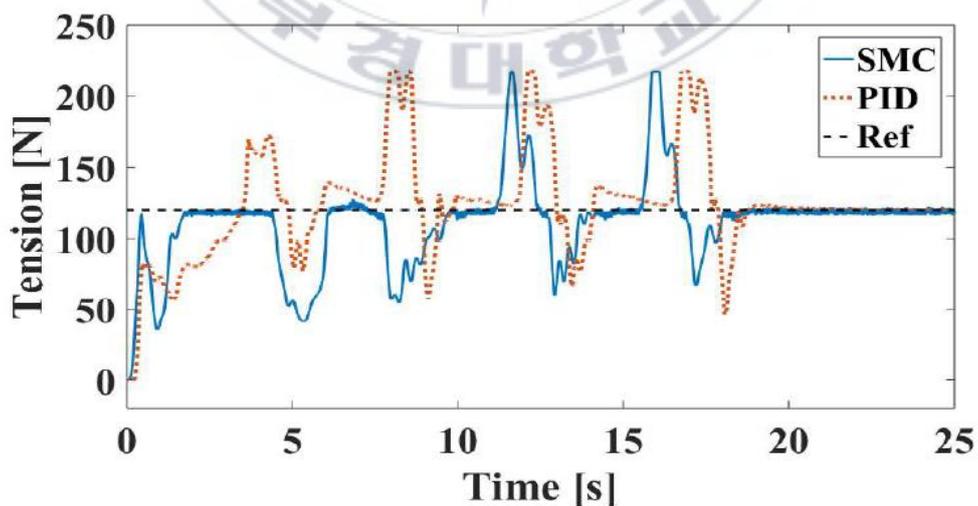


Fig. 4-2 Result of comparing with PID and SMC control for experiments

정에서 오버슈트가 발생하는 것이 발견되었다. Sliding Mode 제어기의 경우 오버슈트는 없는 것으로 확인되지만, 정상상태에서 채터링 현상이 발생하였다.

두 번째 모형실험은 접안 실험으로 적절한 목표값을 설정하여 선박의 접안이 목표 위치까지 도달하는 동안의 제어입력 및 로드셀 계측값을 비교하여 설계한 제어기의 성능을 파악하기 위해 진행되었다. 앞선 실험에서와 동일한 초기 조건으로 실험을 개시하였다.

이번 실험은 선박의 접안이 임의로 지정한 목표값의 위치에 선박이 도달하면 1차 접안을 완료하고 이때 실린더의 비례제어 밸브는 폐쇄된 상태로 로프에 일정한 장력이 걸리면서 선박의 위치를 유지하게 된다. 이후, 2차 접안 실험 개시는 실린더의 비례제어 밸브의 인가전압을 1.8[V]의 전압으로 설정하여 밸브가 약간 개방되도록 하고, 동시에 로프에 주어지는 장력의 목표값도 60[N]으로 감소하도록 설정하였다. 마지막으로 선박이 임의로 지정한 위치에 도달하면 다시 실린더의 비례제어 밸브를 폐쇄하고 로프의 장력 또한 120[N]으로 증가시켜 접안을 완료하도록 하였다.

실험 결과는 Fig. 4-3으로 나타내었다. 각각의 제어기를 적용한 실험에서 로드셀로 계측되는 로프의 장력을 선수, 선미측 1번과 2번 시스템에 대하여 구분하여 나타내었다. 동일한 시스템으로의 접안지원시스템에 주어지는 결과가 상이한 이유는 선박의 무게중심이 1번과 2번 시스템의 정중앙에 위치하지 않고 실험 대상 선박의 선수와 선미의 선저 형상이 달라 접안과정에서 수중에서의 힘이 달라지기 때문으로 분석된다.

1차 접안과정을 살펴보면 목표값에 추종하기 위해 모터는 지속적으로 회전을 전달하고 있으나 선박의 접안으로 실린더의 압축 압력이 비례하여 증가함에 따라 목표값에 즉각적으로 수렴하지는 못하는 것을 볼 수 있었다. 1차 접안 실험에서는 PID 제어기와 Sliding Mode 제어기의 제어 성능

차이는 발견하지 못하였다.

2차 접안이 시작될 때, 실린더의 비례제어 밸브에는 1.8[V]의 전압이 인가되어 밸브가 개방된 상태를 유지함에도 약 2초동안은 변화 없이 목표값을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 실험 장치로 사용된 실린더인 공압 실린더의 특성으로 피스톤과 실린더 사이에 발생한 마찰력 때문인 것으로 판단할 수 있다. 이러한 이유로 약 2초동안은 정지된 상태로 공기가 빠져나가다가 접안 시작되는 것으로 볼 수 있다.

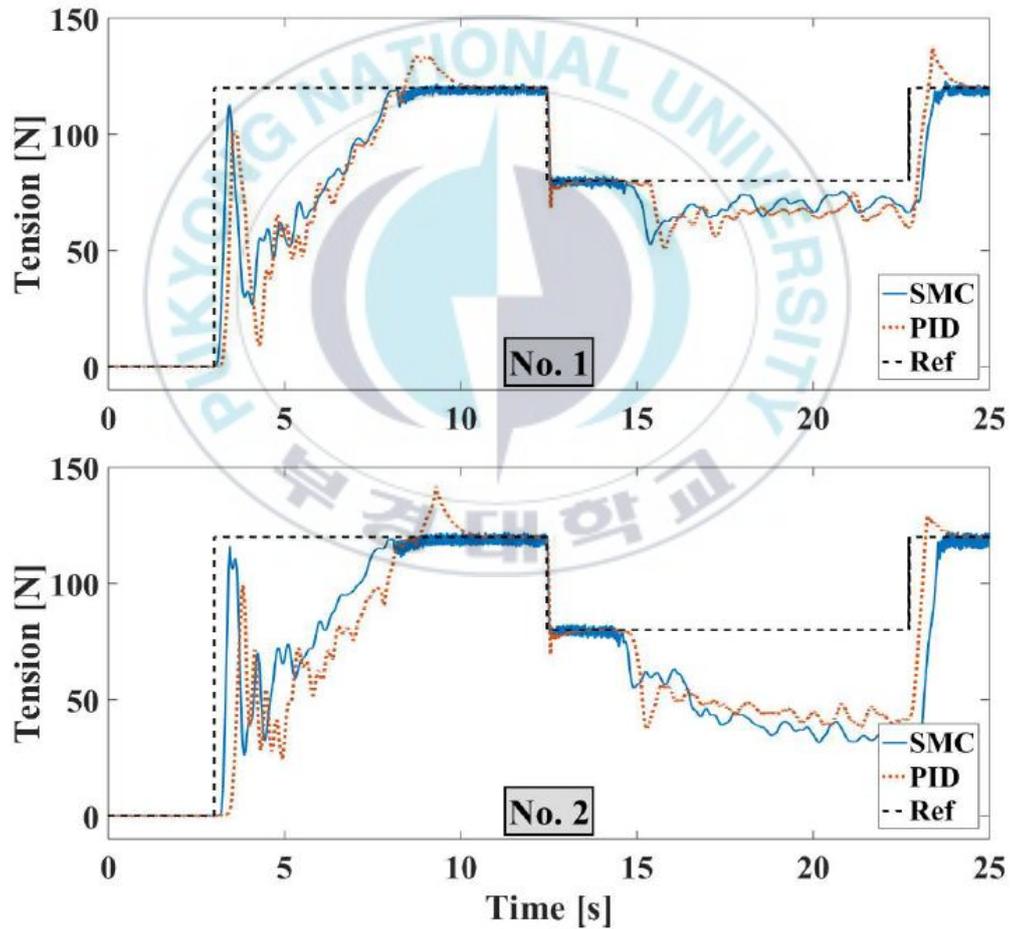


Fig. 4-3 Experimental result for tension

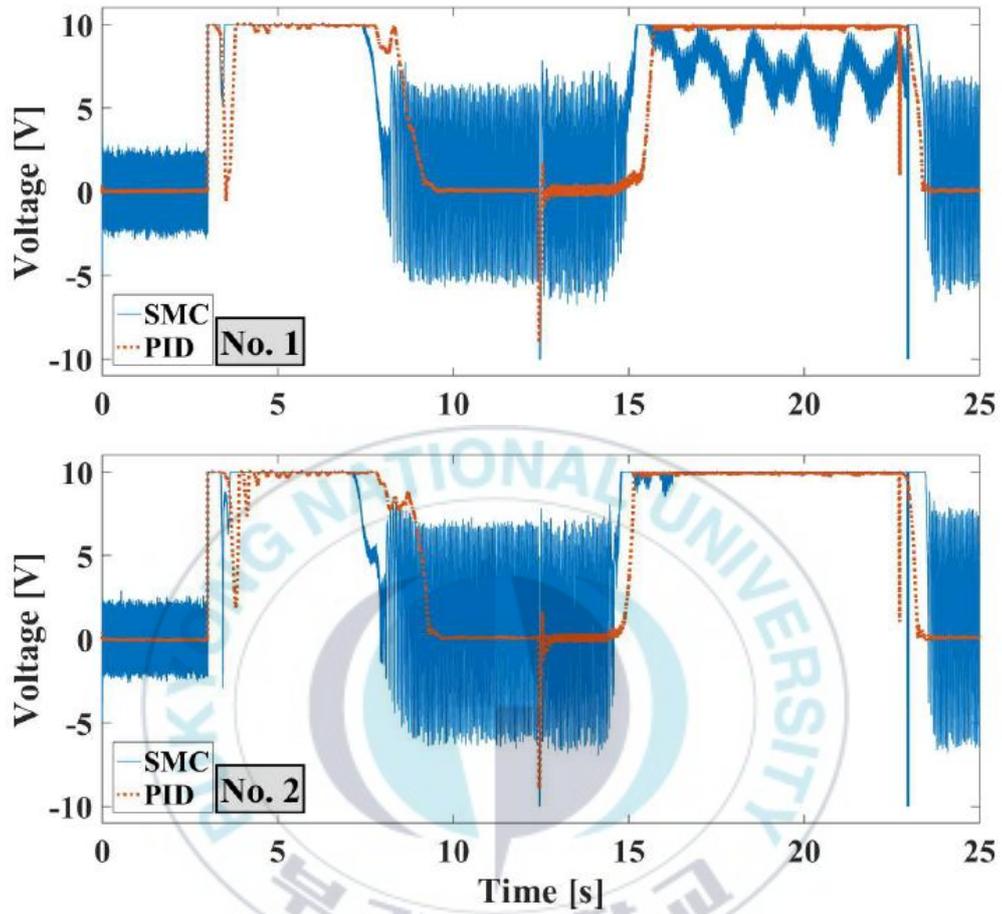


Fig. 4-4 Experimental result for voltage

4.2 선박 접안 모형 실험 결과 분석

실험 결과를 검토해보면 PID 제어기가 적용된 경우에 1차 접안완료 시점, 2차 접안 시작 시점, 2차 접안완료 시점에서 오버슈트 현상이 발견되었다. 그리고 오버슈트가 가장 크게 발생한 결과값은 설계조건인 목표값의 10% 조건을 벗어나는 것을 확인할 수 있었다. Sliding Mode 제어기가 적용된 경우에는 정상 편차와 함께 약간의 채터링 현상이 발견되었다. 채터링의 범위를 확인해 보면 116~122[N]의 범위에서 진동하는 것을 알 수 있었다. 정상 편차는 제어기 설계조건인 목표값 5% 이내 범위를 만족하는 것을 확인하였다. 2차 접안과정에서의 1번 접안지원시스템의 Sliding Mode 제어기 적용 결과를 확인해보면 모터 인가전압이 10[V]이 아닌 그 근방에서 진동하는 것을 확인할 수 있는데 이때의 로프 장력 값을 살펴보면 목표값에 거의 도달해 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Sliding mode 제어를 적용한 경우 오버슈트 현상을 최소화하기 위해 목표값에 근접한 상태에서 적절히 제어입력을 줄인다고 판단할 수 있다.

본 실험을 통해서 PID 제어를 적용한 경우에 오버슈트를 최소화하기 위해 Sliding Mode 제어를 적용할 때처럼 동작하는지는 알 수 없었다. 실험 결과로 PID 제어를 적용하였을 때 발생한 오버슈트 현상과 Sliding Mode 제어를 적용하였을 때 제어입력이 적절하게 줄어들었다는 점을 근거로 판단해 보면 상대적으로 Sliding Mode 제어가 강인한 제어로 오버슈트에 대응한다고 판단할 수 있다.

제 5 장 실선 실험 및 결과

5.1 능동형 선박 접안 시스템 실선 실험

본 연구에서 제안한 윈치-로프와 실린더 펜더를 이용한 선박 접안 지원 시스템의 모형실험을 통해 적절한 제어기의 설계와 시스템의 유효성을 확인하였다. 제1장 서론에서 언급한 대로 선박의 접안은 상당히 까다로운 작업이다. 선박의 접이안 작업에 대한 다수의 경험을 통한 예측 가능한 범위의 위험성 억제는 선박 및 부두 시설별로 작업 절차를 통해 상당 부분 고려하고 있다. 하지만, 예측하지 못한 많은 변수에 즉각적으로 대응할 수 있는 판단력을 가진 선원 및 외부의 도움은 완벽하지 않은 선박 접이안의 위험성 제어로 인해 필수적이다. 모든 선박에 이러한 조건을 갖춘 선원이 상시 승선하도록 국내외의 협약과 법령에서 교육하고 자격을 갖추도록 하고 있지만, 제도적 한계가 있음은 관련 사고가 꾸준히 발생한다는 점에서 확인할 수 있다.

제안된 선박 접안지원 시스템은 이러한 제도의 한계를 극복하고자 선박의 접안과 관련된 주요 요소들을 육상의 설비를 통해서 지원하도록 설계되었다. 실험실에서의 모형 시뮬레이션을 통한 조건의 한계를 극복하기 위한 실선 실험은 본 연구에서 제안된 능동형 선박 접안 시스템의 효용성을 검증하는 중요한 단계이다.

중대형 선박의 정밀한 제어를 위한 제안 장비의 출력은 비례하여 높아야 하므로 이번 실선 실험은 최대 5[m]를 행정으로 하는 실린더형 가이드 장

치를 제작하여 약 2000톤 규모의 선박을 대상으로 접안 실험을 시행하였다.

모형실험을 통해 제안된 선박 접안지원 시스템의 제어기는 Sliding Mode 제어가 PID 제어기보다 선박 접안에 있어 신속성과 안정성이 확인되었다. 하지만 실선 실험을 위한 장비 구축 과정에서 Sliding Mode 제어를 구성하는 데는 어려움이 있었다. 우선 본 연구에서는 상용화된 PID 제어를 기반으로 한 능동형 댐퍼제어시스템을 활용하여 제안된 선박 접안 지원 시스템의 유용성을 검증하고자 하였다.

모형 실험과정에서 설계된 시스템은 선박의 접안 위치에 따라 능동적으로 대응하기 위해 이동식으로 구성하였다. 접안 작업이 수행 가능한 선박과의 거리는 최대 10[m]의 거리에서부터 가능하도록 설계하였다.

실선 실험을 진행한 대상 선박의 최근 접이안 작업이 시작되는 시점인 히빙라인을 던지는 지점이 해당 부두와의 거리가 약 10[m]가 되는 시점이므로 선박이 암벽 또는 부두 시설과 약 10[m]까지 접근하는 과정에서는 자력으로 도선하고 그 이후부터 제안된 시스템의 지원을 받는 것으로 구성하였다.

5.2 능동형 펜더시스템 장치 구성

선박의 접안은 대상 선박의 톤수, 항 내의 해양 환경 등에 따라 많은 변수가 있다. 제안된 시스템은 이런 다양한 변수에 대응하고 제안된 장비의 활용을 극대화하고자 이동식으로 능동형 펜더 시스템을 개발하게 되었다. 제안되는 시스템의 기본적인 개념은 Fig. 5-1로 표현하였다.

접안 대상선박이 윈치-로프 시스템은 예인선을 대신하여 선박을 육상 방향으로 끌어당기는 역할을 하고, 선박의 움직임, 선박과 육상 간의 거리 및 접안에 필요한 정보는 센서를 활용하여 계측하도록 하였다. 제어시스템은 댐퍼 및 윈치 시스템의 적절한 협조 제어로 선박 접안의 안전성과 신속성을 향상시키도록 구성하였다.

능동형 펜더에서 중심이 되는 가이드 장치의 모형실험을 확인한 공압 실린더의 한계를 극복하고 실선 접안에 필요한 에너지를 감당할 수 있도록 유압 실린더로 선정하였다. Fig. 5-3에서 보여지는 사진 위쪽의 실린더는 사진 아래쪽의 가이드 장치에 내장된다. 실선 실험으로 설정한 대상 선박인 2000톤 규모의 선박을 기준으로 선수와 선미에 해당 장비가 위치하도록

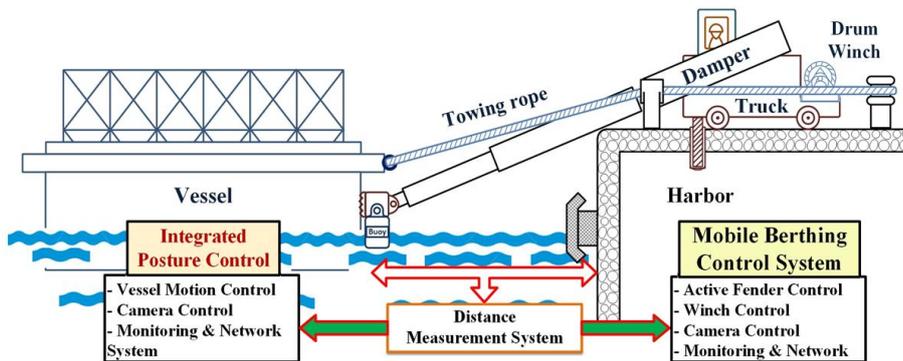


Fig. 5-1 Schematic drawing of the berthing assistance system

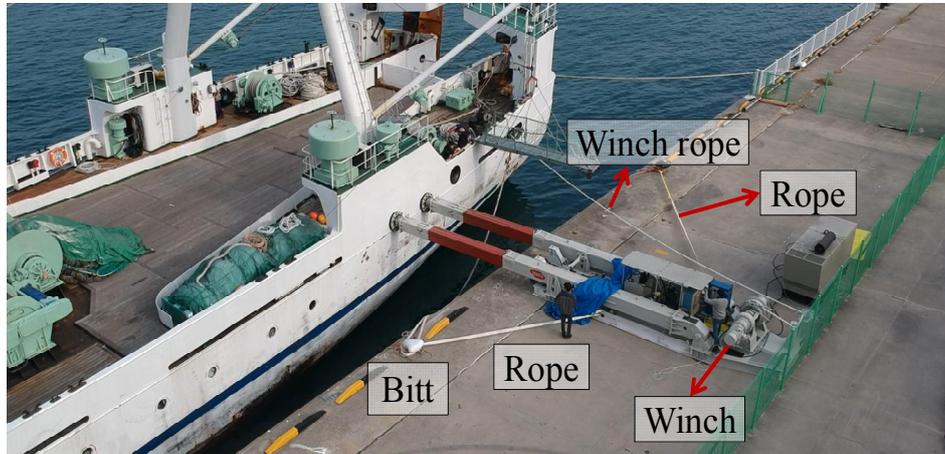


Fig. 5-2 Assembled and attached fender system for berthing

이동형으로 구성된 제안 장비를 설치하였다. 향후 대상 선박에 따라 장비를 추가하거나 그 간격을 조정하는 것이 가능하므로, 부두 설비 및 대상 선박의 규모에 따라 제안 장비의 수를 가감하는 방법으로 다양한 선박의 접이안 작업이 가능하도록 설계하였다.

본 실험에서는 제안된 접안 기술이 실현 가능성을 검증하기 위해 윈치-로프는 수동으로 작동하고, 능동형 펜더는 자동으로 조작하여 접안을 완료하는 실험을 수행하였다. 실제 로프에 걸리는 장력과 댐퍼에 걸리는 부하는 선박이 처한 해양환경에 따른 선박의 불규칙적인 움직임에 영향을 받는다. 이는 선박 접안작업 안정성에 문제가 발생하는 요인이 된다. 실험을 위해 제작된 능동형 펜더는 Fig. 5-2 와 같이 선미 측에 설치하고 대상 선박의 선측에 접촉시켜 힘 조절을 통해 접안되도록 하였다.

Fig. 5-4 는 제안 장비의 제어장치이다. 무선통신을 통한 원격제어가 가능하도록 구성하여 컴퓨터를 이용한 실시간 제어 및 감시가 가능하도록 구성하였다. 능동형 펜더 장치는 두 개의 실린더가 한조로 운동하므로 선박 움직임에 따른 부하 분담이 가능한 균등하게 이루어질 필요가 있다. 두 실

린더의 동특성은 가능한 일치하도록 제작단계에서 운동 특성을 평가하였다. Fig. 5-7 그래프에서 보이는 것과 같이 동일한 운동 특성을 확인하였다. 필요에 따라 두기의 실린더를 각각 독립 제어가 가능하게 제작하였다.

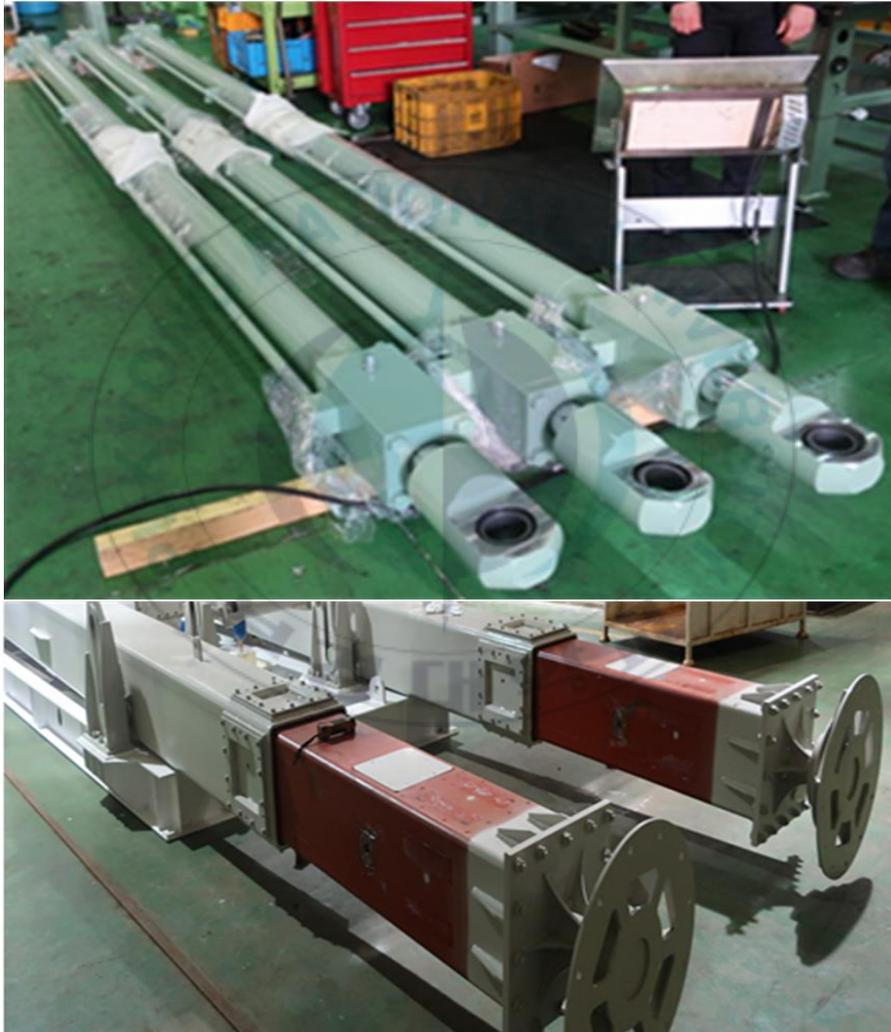


Fig. 5-3 Cylinder(up) and cylinder inside fender system(down)



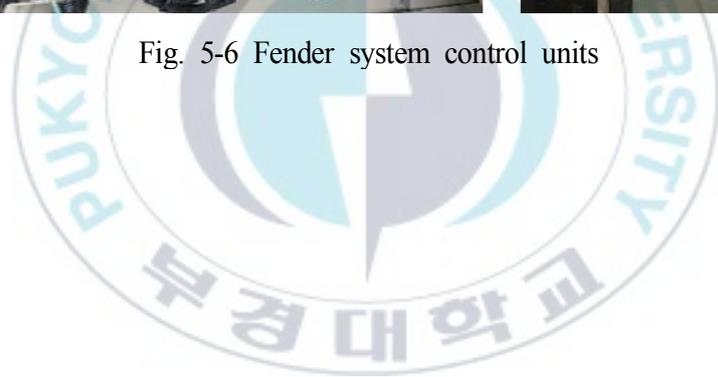
Fig. 5-4 Front side of the fender(attaching part)



Fig. 5-5 Winch system installed on the fender system



Fig. 5-6 Fender system control units



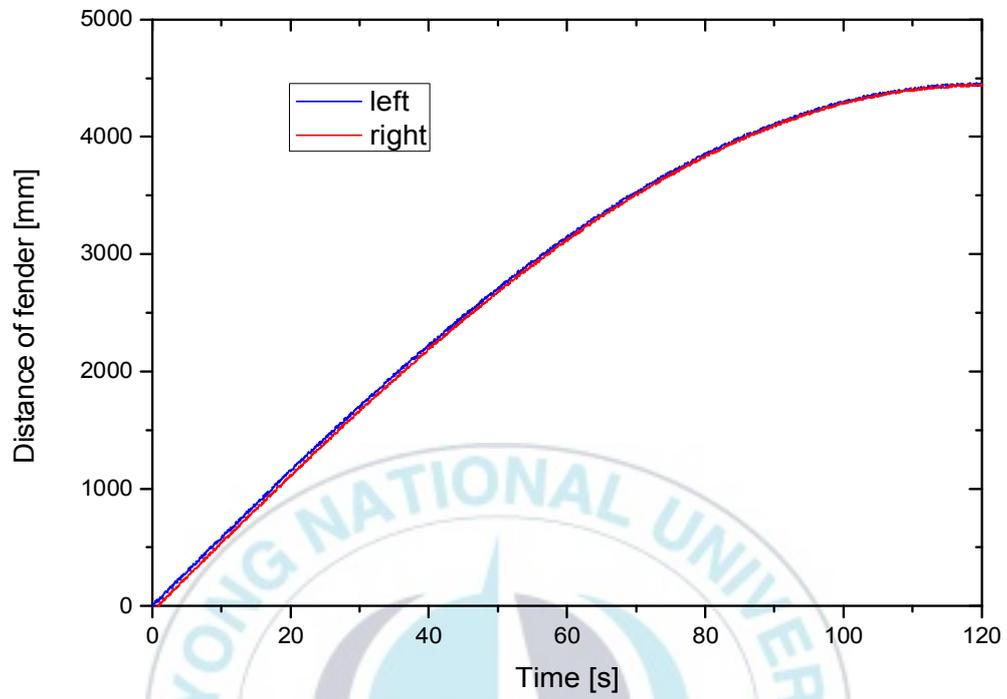


Fig. 5-7 Dynamic responses of the fender cylinders

5.3 능동형 펜더시스템 장치 실험

능동형 펜더는 실린더형 가이드 장치 및 윈치시스템으로 구성하였다. 윈치를 일정한 속도로 회전시켜 선박을 안벽으로 이동한다고 가정하더라도 선박이 처한 해양환경의 조류, 바람, 파고 등과 같은 외란 유체력 특성 변화의 영향으로 선형적인 선박 운동 특성을 기대할 수 없다.

이러한 상황을 고려하여 선박 접안 실험의 안정성 확보를 위해 댐퍼의 역할이 중요하다고 판단할 수 있다. 이번 실험에서는 댐퍼에 가해지는 압력을 일정하게 유지하도록 설정하여 대상 선박이 안벽으로 접근하는 동안 선박의 운동을 적절히 제어하였다. 실험의 전반적인 사항은 Fig. 5-8와 같이 구성하였다.

선박의 접·이안 상태를 감시하는 모니터링시스템 운영알고리즘의 플로차트는 Fig 5-9 로 나타내었다. Fig. 5-10은 GUI 시스템 화면을 나타내고 있다. 여기에는 선박의 이동 속도, 선박과 장비 즉, 안벽과의 거리, 능동형 펜

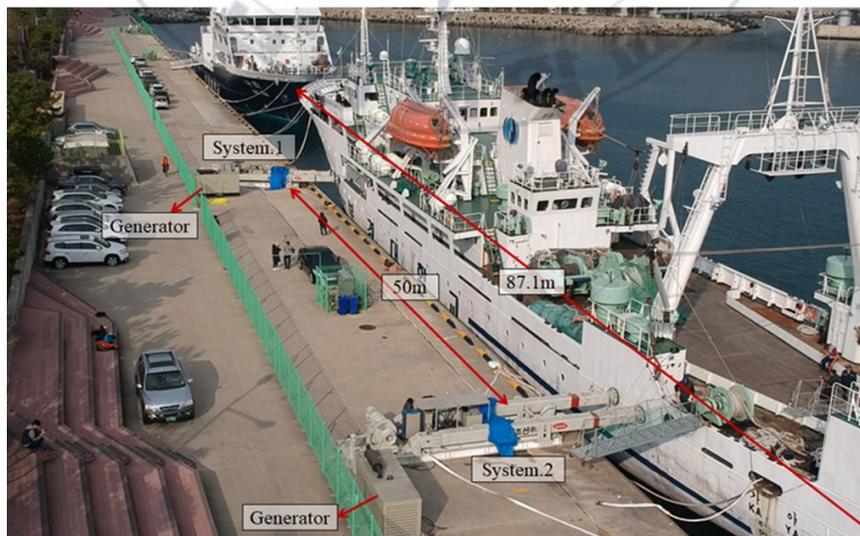


Fig. 5-8 Ship berthing test arrangement plan

더 실린더 스트로크 및 압력 등 선박의 접안과정에 필요한 정보를 확인할 수 있도록 구성하였다.

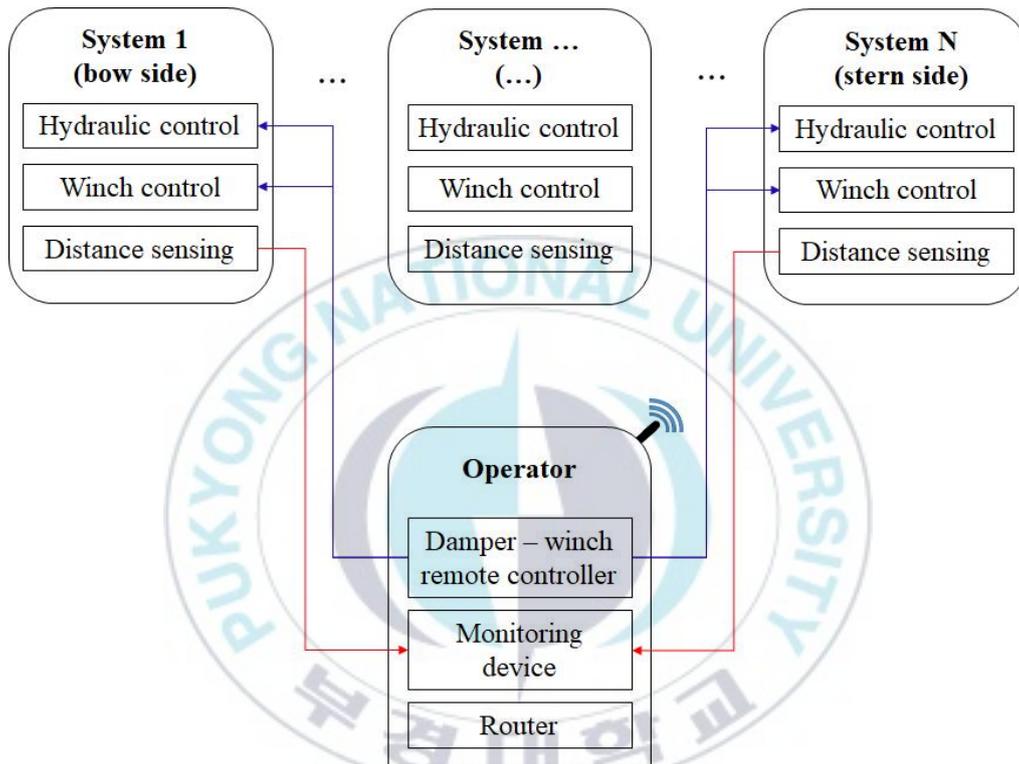


Fig. 5-9 Flowchart for configuration the GUI system

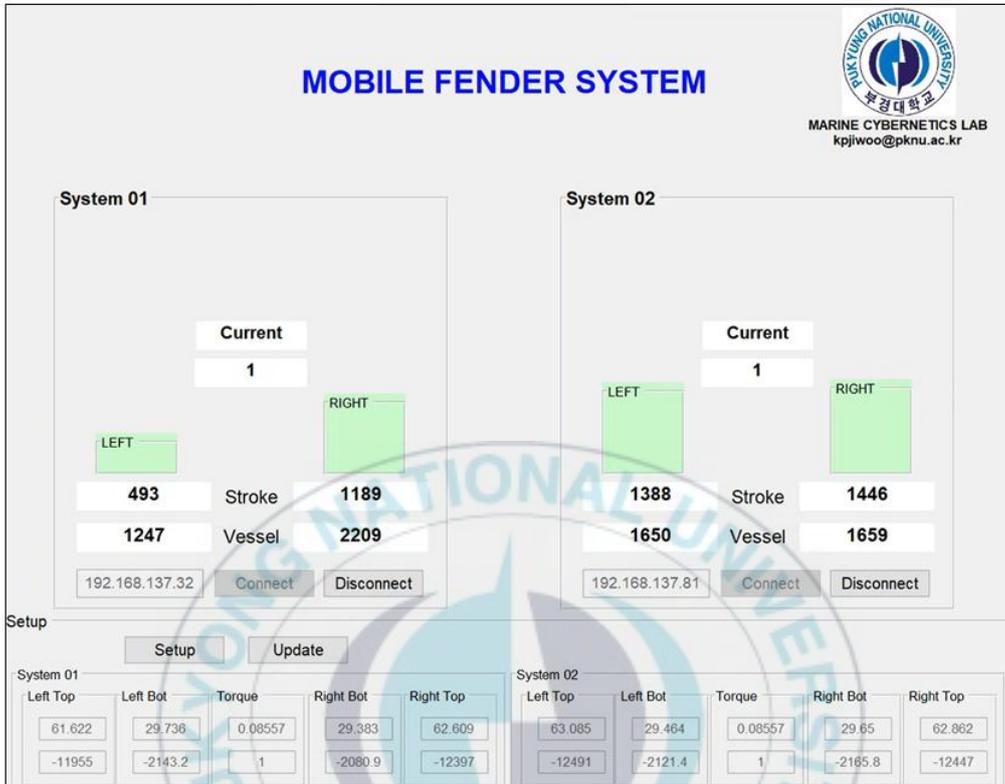


Fig. 5-10 GUI monitoring system

5.4 능동형 펜더시스템 장치 실험 결과

선박이 안벽에 완전히 접안된 상태에서 실험을 개시하였다. 실험이 시작되고 대상 선박의 이안을 시작하고 안벽에서 선박의 거리가 선수 2.0[m], 선미 1.5[m]로 해상 측으로 이동한 후, 정지한 상태인 위치에서 일정 시간 대기하고 다시 안벽 측으로 접근하는 실험을 반복적으로 수행하였다. 실험 과정의 순서는 Table. 5-1과 같이 진행되었다.

실험 과정에서 선박의 이동 평균속도는 선수 측 0.93[m/min], 선미 측 0.76[m/min]으로 관찰되었다.

실험 결과를 시간 경과에 따른 선박의 거리와 실린더의 스트로크의 변화량을 Fig. 5-8, 5-9 그래프로 자세히 나타내었다. 세로방향의 붉은 실선은 왼쪽 실선은 이안이 종료되는 상태 유지 시작 지점, 오른쪽 실선은 접안이 시작되는 상태 유지 종료 시점을 표시한 것이다. 1번 시스템은 선수 측 장비의 계측값이고, 2번 시스템은 선미 측 장비의 계측값을 나타내었다.

Table. 5-1 Time chart of experiment

Time	Description
11:12	Start to de-berthing
11:15	Move to the target position (Bow side 2.0[m], stern side 1.5[m])
11:15 ~ 11:39	Maintain the position (Stop section)
11:39	Start to berthing
11:41	Berthing complete

실험 결과를 분석해보면 이안구간에서 1번, 2번 장비 모두 진동적 특성을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 상태 유지구간인 정지 구간에서도 나타나고 있다. 해당 현상은 대상 선박 주변의 타선박의 이동과 이로 인해 발생한 파도와 바람의 영향 및 선박의 관성력에 따른 것이다. 반면 본 연구에서 제안한 장비의 운용 목적인 접안의 과정에서는 이러한 진동적 특성이 나타나지 않고 자연스럽게 안벽과 대상 선박과의 거리가 좁혀지는 것을 확인할 수 있다.

대상 선박의 이안 과정 및 정지 구간에서 외부 영향으로 진동적 특성이 나타나는 것은 댐퍼가 지지하고 있는 안벽 측이 아닌 해상 측으로는 선박의 운동을 구속해 줄 수 있는 구조물이 없기 때문이다. 단지 제안된 장비의 윈치-로프 장력에 의한 구속력만 작용한다. 이때 충분한 억제력을 가진 윈치-로프 시스템이라면 진동적 특성을 억제할 수 있다. 이번 실선 실험의 대상 선박은 실험 장비의 설계규격을 초과하는 규모이며, 실험 과정 중의 로프의 장력 증가로 인한 파단 등의 위험을 고려하여 기준값을 초과하지 않도록 실험 조정값을 제한하여 실험을 수행한 한계가 있다. 실제 안벽 측이 아닌 해상 측으로부터의 진동적인 선박 운동은 선박의 접안과정에서 큰 문제가 되지는 않는다.

실험 결과 그래프에서 나타난 것처럼 정지 구간에서 일정 거리 이하로는 선박의 이동되지 않고 있다. 이는 본 실험을 통해 검증하고자 하는 댐퍼가 안벽 측으로의 선박의 움직임을 충분히 억제하고 있음을 나타낸다. 정지 구간이 지나고 접안이 시작되는 시점인 접안과정에서는 댐퍼와 윈치-로프 제어를 동시에 수행하여 불안정한 진동적 특성 없이 자연스러운 접안 작업이 가능함을 확인하였다.

결과적으로 능동형 펜더를 기반으로 한 선박 접안 지원 시스템의 규격을 벗어난 선박을 대상으로 한 실험인 상황을 고려하더라도 제안된 장비를 이

용하면 선박의 접·이안 작업의 신속성과 안정성이 향상될 수 있음을 확인할 수 있었다.

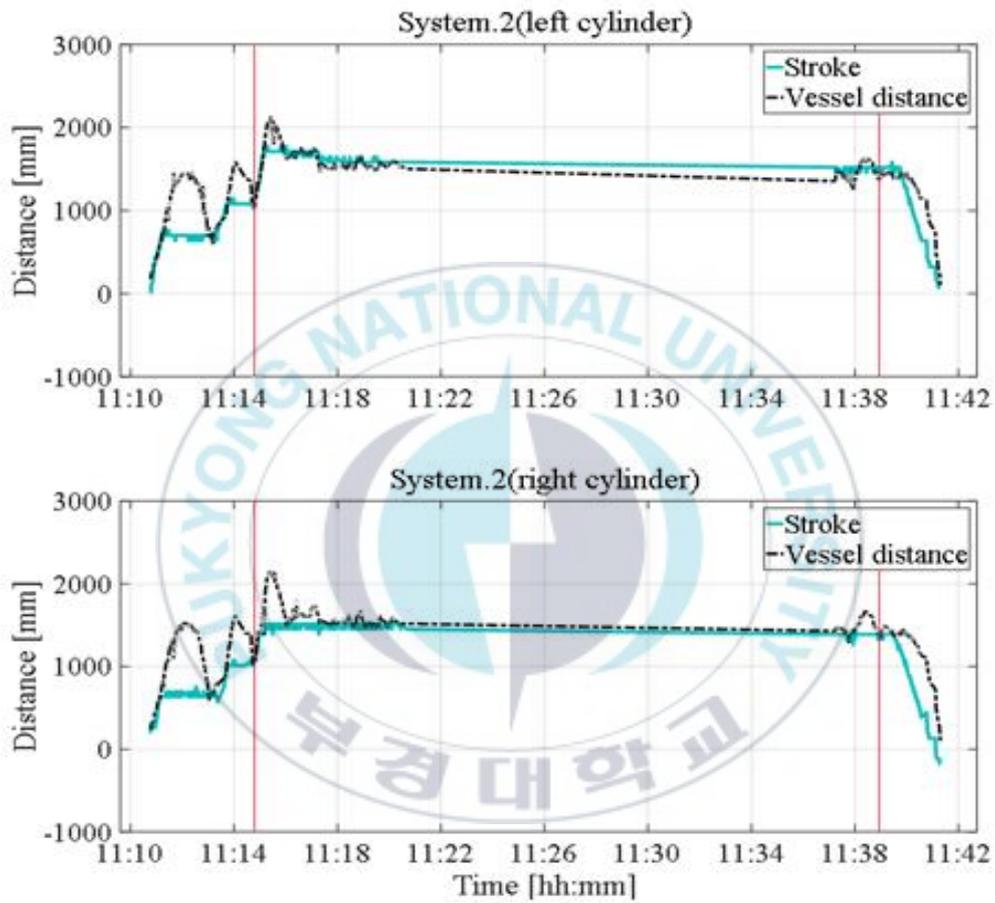


Fig. 5-12 Strock of fender cylinder and distance of ship from quay side (stern side)

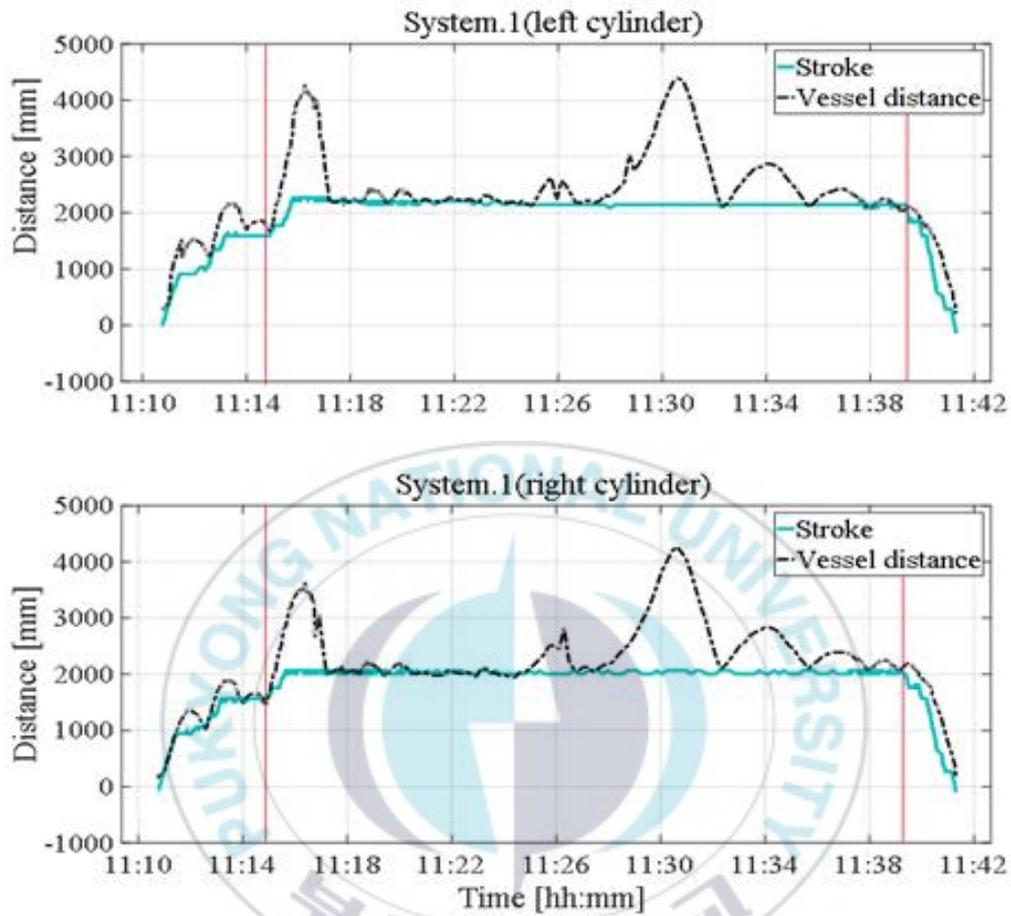


Fig. 5-11 Stroke of fender cylinder and distance of ship from quay side (bow side)

제 6 장 결 론

본 연구에서는 능동형 펜더를 기반으로 한 새로운 접안지원시스템을 제안하였다. 윈치-로프와 실린더형 댐퍼를 사용한 방법이다. 제안된 기술의 개발을 위해 실험에 사용한 제어기는 널리 사용 중인 PID 제어기와 강인 제어 분야에서 대표적인 Sliding Mode 제어기 총 두 가지를 사용하여 제어 성능을 파악하였다.

실험의 결과로 두 제어기 모두 목표값을 추종하는 결과를 확인하였다. 우선 PID 제어기의 경우, 정상상태에서 로프에 걸리는 장력 계측값이 목표값과 일치하는 결과를 보이는 우수한 추종 성능을 보여주었으나 정상상태에 도달하는 과정에서의 오버슈트 현상은 장비의 안정성 부분을 고려한 설계조건을 벗어나는 결과를 나타내었다. Sliding Mode 제어기의 경우에는 상대적으로 PID 제어기를 사용한 실험보다 빠르게 목표값에 도달하였으며, PID 제어기에서 발생한 오버슈트 현상은 발견되지 않았다. 다만, 정상상태에 도달하면 제어기의 특성상 채터링 현상이 발견되었다. 채터링의 폭은 중심이 목표값보다 약간 낮게 나타나 PID 제어기를 적용한 경우보다는 상대적으로 정상편차가 크다고 판단되었다. 이는 설계조건 범위에는 만족하는 것으로 확인되었다. 시뮬레이션과 실험 결과를 바탕으로 설계한 두 제어기는 각각의 장단점이 분명히 존재하는 방식이다. 두 방식의 장점을 모두 갖는 적분기가 적용된 Sliding Mode 제어기를 적용하는 것이 제어적인 측면에서 이점이 있을 것으로 판단된다. 또한 제어기 설계과정에서 확인된 한계는 앞으로의 선박 접안 자동화 개발에서 개선될 필요가 있을 것이다.

이번 연구에서는 새로운 개념의 이동식 선박 접안지원시스템을 실험적인

제안에 그치지 않고 실선 실험을 통해 그 유용성을 검증하고자 하였다. 선박의 접안과정에서 신속성과 안정성이 동시에 향상되기 위해서는 많은 어려움이 있다. 이러한 이유로 선박 접안 자동화와 관련된 기술 개발은 제한적으로 진행되고 있다. 제안된 선박 접안지원시스템은 선박의 접안과정에 필요한 주요 요소를 식별하고 이를 자동화하기 위해 대체 가능한 방안을 제안하였다.

원치-로프는 접안하고자하는 선박에 주어지는 외력에 해당하는 예인선의 역할을 하도록 구성하였고, 맴퍼는 실린더형으로 제작하여 스트로크 조절을 통해 안벽 간의 거리를 제어하였다. 이는 노련한 선장과 도선사의 판단을 보완하여 선박의 안정성을 향상시키는 역할을 하도록 설계되었다.

실험 과정에서 실험 장비의 한계로 목표값에 도달하는 데 영향이 있었다. 또한 실선 접안 실험이 제안된 장비의 설계된 규모를 벗어나는 선박으로 진행되어 전체적으로 모두 안정적인 결과를 도출하는 데 한계가 있었다. 이러한 상황을 고려하더라도 접안되는 과정에서의 진동적인 특성이 발견되지 않고 신속히 접안 실험이 완료된 것을 바탕으로 제안된 새로운 선박 접안지원 시스템은 선박 접안의 신속성과 안정성을 개선하는데 유효하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Kim, K. H., Kim, B. G. and Kim, Y. B.(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.
- [2] Kim, Y. B., Choi, Y. W. and Chae, G. H.(2006a), "A Study on the Development of Automatic Ship Berthing System", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Autumn Conference, pp. 419-423.
- [3] Kim, Y. B., Choi, Y. W., Suh, J. H. and Lee, K. S.(2006b), "A Study on the Development of the Real-Time Detection Technique for Automatic Ship Berthing", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Spring Conference, pp. 306-313.
- [4] Bui, V. P. and Kim, Y. B.(2011a), "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.
- [5] Y. B. Kim, "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, 2013
- [6] Kim, Y. B.(2015), Movable Fender System, Korean Patent Registration No. : 1015664820000.
- [7] Bui, V. P., Jenog, J. H., Kim, Y. B. and Kim, D. W.(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.
- [8] Bui, V. P., Jenog, J. H., Kim, Y. B. and Kim, D. W.(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.
- [9] Bae, C. H., Lee, S. K., Lee, S. E. and Kim, H.(2008), "A Study of the Automatic Berthing System of a Ship Using Artificial Neural Network", *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 38, No. 8, pp. 589-596
- [10] Hasegawa, K. and Fukutomi, T.(1994), "On Harbour Maneuvering and Neural Control System for Berthing with Tug Operation", *Proceedings of International Conference Maneuvering and Control of Marine Craft*, pp. 197-210.
- [11] CAVOTEC, <https://www.cavotec.com/en/>
- [12] Thor I. Fossen, "Marine Control Systems", *Marine cybernetics*, 2002
- [13] K. Hasegawa and K. Kitera, "Automatic Berthing Control System Using Network and Knowledge-base", *Journal of Kansai Society of NA Japan*, vol. 220, pp. 135-143 1993.09
- [14] P. C. Young and J. C. Willems, "An approach to the linear multivariable servo-mechanism problem", *International journal of control*, vol.15, no.5, pp. 961-979, 1972
- [15] H. Kobayashi "A study of supporting system for berthing maneuver" *Journal of the society of naval architects of Japan*, vol.182, pp. 445-455, 1998.03
- [16] Y. A. Kasabeh, M. M. A. Pouzanjani and M. J. Dove, "Automatic

- berthing of ships”,Proceeding of the institute of marine engineer 3rd international conference on maritime communications and control, pp. 10-17, 1993
- [17] Y. Jhang, G. E. Hearn and P. Sen, “A Multivariable neural controller for automatic ship berthing”, IEEE Journal of control systems, vol.17, pp. 31-45, 1997
- [18] Zhang, Y., Hearn, G. E. and Sen, P.(1997), "A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing", IEEE Control Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 31-45.
- [19] Nguyen, V. S. and Im, N. K.(2019), "Automatic Ship Berthing based on Fuzzy Logic", International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 163-171.
- [20] C. Chung, M. S. Lee and S. H. Kang(2021), “A Study of 100tonf Tensile Load for SMART Mooring Line Monitoring System Considering Polymer Fiber Creep Characteristics”, Journal of Ocean Engineering and Technology 35(4), 266-272,
- [21] J. Yan, D. Qiao, B. Li, B. Wang, H. Liang, D. Ning, and J. Ou(2021), "An Improved Method of Mooring Damping Estimation Considering Mooring Line Segments Contribution", Journal of Ocean Engineering Volume 239, 109887 (<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109887>)
- [22] L. Johanning, G. H. Smith, J. Wolfram(2007), "Measurements of Static and Dynamic Mooring Line Damping and Their Importance for Floating WEC Ddevices", Journal of Ocean Engineering Volume 34, 1918-1934
- [23] K. Wróbel, J. Montewka, and P. Kujala(2018), “System-theoretic Approach toSafety of Remotely-controlled Merchant Vessel,” Journal of

- Ocean Engineering, vol.152, pp. 334-345 (DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.020)
- [24] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan(2016), “Unmanned Surface Vehicles: An Overview of Developments and Challenges,” Annual Reviews in Control, vol. 41, pp. 71-93 (DOI: 10.1016/j.arcontrol)
- [25] N. Im(2012), “A Study on Ship Automatic Berthing with Assistance of Auxiliary Devices,” International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 4, is. 3, pp. 199-210 (DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0090)
- [26] S. Sakakibara, and M. Kubo(2007), “Ship Berthing and Mooring Monitoring System by Pneumatic-type Fenders,” Journal of Ocean engineering, vol. 34, is. 8-9, pp. 1174-1181. (DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.07.006)
- [27] S.N. Das, S. Kulkarni, and M.D. Kudale(2015), “Design of Safe Mooring Arrangement for Large Oil Tankers”, Journal of Procedia Engineering, vol. 116, pp. 528-534. (DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.322)
- [28] M. Perkovic, M. Gucma, B. Luin, L. Gucma, and T. Brcko(2017), “Accommodating Larger Container Vessels Using an Integrated Laser System for Approach and Berthing,” Journal of Microprocessors and Microsystems, vol. 52, pp. 106-116. (DOI: 10.1016/j.micpro.2017.05.015)
- [29] K.-H. Lee, H.-S. Han, and S. Park(2015), “Failure Analysis of naval vessel's Mooring System and Suggestion of Reducing Mooring Line Tension Under Ocean Wave Excitation”, Journal of Engineering Failure Analysis, vol. 57, pp. 296-309. (DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.005)
- [30] H.S. Hung, S.N. Pyo, and L.J. Hwan(2011), “Berthing System, Berthing Equipment, and Berthing Method,” KR 101089263. (Google Patents,

<https://patents.google.com/patent/KR20100097586A>)

- [31] X. Yuyi(2017), “Automatic Berthing Device for Ships,” CN 106945785.
(Google Patents, <https://patents.google.com/patent/CN106945785A>)
- [32] Z. Bo, C. Anlong, Z. Guiyong, and Z. Zhi(2018), “Automatic Magnetic Mooring Device,” CN 108674582, 19 October 2018. (Google Patents,<https://patents.google.com/patent/CN108674582A>)
- [33] M. Blaich, S. Wirtensohn, M. Oswald, O. Hamburger, and J. Reuter(2013), “Design of a Twin Hull Based USV with Enhanced Maneuverability”, IFAC Proceedings, vol. 46, is. 33, pp. 1-6. (DOI:10.3182/20130918-4-JP-3022.00056)
- [34] G.T. Schmidt(2015), “Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments”, Chinese Journal of Aeronautics, vol. 28, is. 1, pp.1-10. (DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.001)
- [35] R. Yang, H. J. Tang, and C. C. Huang(2020), "Numerical Modeling of the Mooring System Failureof an Aquaculture Net Cage System Under Waves and Currents", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 45, no. 4
- [36] P. Sun, S. Liu, H. He, Y. Zhao, S. Zheng, H. Chen, S. Yang(2021), "Simulated and Experimental Investigation of a Floating-Array-Buoys Wave Energy Converter with Single-point Mooring", Journal of Renewable energy, 176, 637-650 (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.084>)
- [37] C. Edwards and S. K. Spurgeon(1998), "Sliding mode control theory and applications", T. J. International Ltd, Padstow, UK. (ISBN:9780748406012)
- [38] S. K. Spurgeon(2008), "Sliding mode observers: a Survey", International Journal of System Science, Vol. 39, No. 8, pp. 751-764.

(<https://doi.org/10.1080/00207720701847638>)

- [39] L. Fridman, J. Moreno and R. Iriarte(2011),"Sliding modes after the first decade of the 21st century", Springer. (<https://doi.org/10.1007/978-3-642-22164-4>)
- [40] J. Rivera¹, L. Garcia, C. Mora, J. J. Raygoza and S. Ortega(2011), Sliding mode control, InTech, India. (ISBN: 978-953-307-162-6)
- [41] A. Bacciotti and L. Rosier(2005), "Liapunov functions and stability in control theory", Springer. (ISBN: 978-3-540-21332-1)
- [42] A. Barth, M. Reichhartinger, J. Reger, M. Horn and K. Wulff,(2015), "Lyapunov-design for a super-twisting sliding-mode controller using the certainty-equivalence principle", International Federation of Automatic Control, Vol. 2015, No.48-11, pp. 860-865. (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.298>)
- [45] J. Davila, L. Fridman, and A. Levant(2005), "Second-order sliding-mode observer for mechanical systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 50, No. 11, pp. 1785-1789. (<https://doi.org/10.1109/TAC.2005.858636>)
- [46] P. Shah, D. Ingole, P. Ubare, D. Sonawane(2021), "Performance Improvement of BLDC Motor Speed Control Using Sliding Mode Control and Observer", Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA) Indian Institute of Technology, Goa, India. 20-22
- [47] Rashidi, J., Ahmadi, A., Seif, M.S., Azarsina, F.(2015), "The Effect of Different Mooring Configuration on Semi-Submersible Platform Behavior", Sixth International Offshore Industries Conference. Tehran.
- [48] Sabzian, H., Azarsina, F., Ghasemi, H., Kazemi, S. (2014), "Investigation

- of a Proper Mooring Configuration for a Semi-Submersible Platform to Minimize Horizontal Movements and Forces Imposed on Mooring Lines", In Sixteenth Marine Industries Conference. BandarAbbas.
- [49] Kvitrud, A.(2014), "Lessons Learned From Norwegian Mooring Line Failures 2010 - 2013", International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE). San Francisco p. V04AT02A005.
- [50] S. Kim, C. Ryu, J. Lee, K. Lee, K. Baek, S. Sohn, J. Choi(2018), "On the Docking Analysis of Global Ship Structure Using Simplified Grillage Model", Journal of the Society of Naval Architects of Korea 45(6), 710-718
- [60] S. Hong, J. Kim(2021), "Reinforcement Learning Based Tugboats Control for Autonomous Ship Berthing" ,Journal of the KNST 4(1), 72-77
- [61] J. Park, J. Kim(2021), "Automatic Ship Berthing by Switching Between PID and Sliding Mode Controllers Based on Reachability Analysis", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 105-106.
- [62] S. Y. Jun, Y. M. Kim, B. G. Woo, H. Chung(2008), "A Systematic Approach to Decide Maximum Berthing Ship Size Coupled with Berth Design Criteria", Journal of the Korea Society of Environment & Safety, vol.14, no.1, pp.45-54.
- [63] A. Jha, D. Subedi, P. Løvslund, I. Tyapin, L. Cenkeramaddi, B. Lozano and Geir Hovland(2020), "Autonomous Mooring towards Autonomous Maritime Navigation and Offshore Operations", IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 1171-1175
- [64] K. P. Divakarla, A. Emadi, and S. Razavi (2019), "A Cognitive Advanced Driver Assistance Systems Architecture for Autonomous-capable

- Electrified Vehicles,” IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 5, pp. 48 - 58.
- [65] M. BARBIER, E. BENSANA, and X. PUCCEL(2018), “A Generic and Modular Architecture for Maritime Autonomous Vehicles,” IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), pp. 1 - 6, Nov 2018.
- [66] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik(2014), “Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation,” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 580 - 587.
- [67] D. Subedi, A. Jha, I. Tyapin, and G. Hovland(2020), “Camera-Lidar Data Fusion for Autonomous Mooring Operation”, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)
- [68] D. Subedi, A. Jha, I. Tyapin and G. Hovland(2020), "Camera-LiDAR Data Fusion for Autonomous Mooring Operation", 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 1176-1181
- [69] A. Butsanets, E. Ol'khovik(2019), "Development of Technical Means for Mooring the Unmanned Vessels", International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)
- [70] K. Wróbel, J. Montewka, and P. Kujala(2018), “System-Theoretic Approach to Safety of Remotely-Controlled Merchant Vessel”, Journal of Ocean Engineering, vol.152, pp. 334-345. (DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.020)
- [71] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan(2016), “Unmanned Surface Vehicles: An Overview of Developments and Challenges”, Annual

- Reviews in Control, vol. 41, pp. 71-93. (DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018)
- [72] N. Im, “A Study on Ship Automatic Berthing with Assistance of Auxiliary Devices”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 4, is. 3, pp. 199-210. (DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0090)
- [73] S. Sakakibara, and M. Kubo(2007), “Ship Berthing and Mooring Monitoring System by Pneumatic-type Fenders”, Journal of Ocean engineering, vol. 34, is. 8-9, pp. 1174-1181. (DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.07.006)
- [74] S.N. Das, S. Kulkarni, and M.D. Kudale(2015), “Design of Safe Mooring Arrangement for Large Oil Tankers”, Journal of Procedia Engineering, vol. 116, pp. 528-534. (DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.322)
- [75] M. Perkovic, M. Gucma, B. Luin, L. Gucma, and T. Brcko(2017), “Accommodating Larger Container Vessels Using an Integrated Laser System for Approach and Berthing,” Journal of Microprocessors and Microsystems, vol. 52, pp. 106-116. (DOI: 10.1016/j.micpro.2017.05.015)
- [76] K.-H. Lee, H.-S. Han, and S. Park(2015), “Failure Analysis of Naval Vessel's Mooring System and Suggestion of Reducing Mooring Line Tension Under Ocean Wave Excitation”, Journal of Engineering Failure Analysis, vol. 57, pp. 296- 309. (DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.005)
- [77] C. Canbin, Z. Wuxi, X. Qingguang, and L. Daixiang(2018), “Parking lock and unmanned ship automatic recovery system with same,” CN 108820134, 16 .
(Google Patents, <https://patents.google.com/patent/CN108820134A>)
- [78] H.S. Hung, S.N. Pyo, and L.J. Hwan(2018), “Berthing System, Berthing

- Equipment, and Berthing Method,” KR 101089263. (Google Patents, <https://patents.google.com/patent/KR20100097586A>)
- [79] G.T. Schmidt(2014), “Navigation Sensors and Systems in GNSS Degraded and Denied Environments”, Chinese Journal of Aeronautics, vol. 28, is. 1, pp. 1-10. (DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.001)
- [80] S. W. Lee, K. Sasa, S. Aoki, K. Yamamoto, C. Chen(2021), "New Evaluation of Ship Mooring with Friction Effects on Mooring Rope and Cost-Benefit Estimation to Improve Port Safety", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, no. 13, 306-320. (<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.04.002>)
- [81] X. Li, H. Wei, L. Xiao, Z. Cheng, M. Liu(2021), "Study on the Effects of Mooring System Stiffness on Air gap Response", Journal of Ocean Engineering, 239, 109798. (<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109798>)
- [82] M. Tabeshpour, S. Abbasian,(2021), "The optimum mooring configuration with minimum sensitivity to remove a mooring line for a semi-submersible platform", Journal of Applied Ocean Research, 114, 102766. (<https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102766>)

감사의 글

마무리를 하는 시점에서 지나온 과정을 돌이켜 본다는 것은 하나의 결과를 위해 얼마나 많은 도움이 있었는지를 생각하게 됩니다. 학위를 마무리할 수 있도록 도움주셔서 진심으로 감사드립니다. 무엇보다 아낌없는 가르침을 주신 김영복 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 교수님의 기대에 미치지 못한 못난 제자가 되는 것 같아 늘 죄송하고 감사했습니다. 학업과 연구를 위한 다양한 경험 들을 배우고, 앞으로의 방향에 대해서도 많은 생각들을 할 수 있었습니다. 감사 인사를 올리며 앞으로의 조언을 기대하는 것이 염치가 없겠지만, 존경스런 마음에 드는 생각은 가실 수 없습니다. 박사 과정을 준비하는 기간에 교수님의 가르침으로 많은 일들을 함께 할 수 있었습니다. 사랑하는 아내와 함께 할 수 있도록 증인이 되어 주시고, 우리 딸 서아가 건강하고 바르게 자랄 수 있도록 아껴주신 은혜는 말로 다 표현할 수 없을 정도입니다. 교수님과 함께 할 수 있어서 영광이라는 말을 감히 전해드리고 싶습니다. 교수님의 가르침을 본받아 저도 저의 위치에서 후학들을 올바르게 지도할 수 있도록 꾸준히 노력하겠습니다.

학위 논문 심사에 소중한 시간을 할애해 주신 류지열 교수님, 서진호 교수님, 지상원 교수님, 박환철 박사님께도 감사의 인사를 올립니다. 학위 과정에서 그리고 논문 심사를 통해서 배움을 주신 은혜를 바탕으로 더 나은 연구자가 될 수 있도록 끊임없이 노력하겠습니다. 심사 조언의 말미에 앞으로 재미있는 아이템이 될 것 같다는 말씀은 향후 연구에 대한 내용뿐만 아니라, 즐기며 살아가는 방법에 대한 인생 조언과도 같았습니다. 나은 사람이 되어가는 방향으로 성장할 수 있도록 하겠습니다.

그리고 늦은 귀가에도 늘 저를 다독여주고 지원해준 사랑스런 아내와 보는 것만으로도 저에게 항상 힘을 주는 우리 서아의 미소는 부족한 저를 항상 채워주었습니다. 우리 가족이 제가 여기까지 오게 해준 원동력이자 앞으로의 꿈이라 생각합니다. 앞으로도 든든한 남편이자 아빠로 가족의 버팀목이 되겠습니다.

그리고 존경하는 후배이자 연구자로 한걸음 더 나아간 이동훈 박사에게도 감사의 인사를 전합니다. 함께 학위 과정들을 준비한 실험실 식구들의 지원이 없었다면 마무리 하지 못했을 과정이라 생각합니다. 늘 감사하고 앞으로 나아가는 길에 제가 도움이 될 수 있도록 지원하겠습니다.

마지막으로 저의 오랜 친구이자 버팀목이신 아버지께 감사인사를 드립니다. 편하게 이야기하고 즐겁게 시간을 보내는 일상적인 많은 부분들이 아버지의 조언과 지원에서 만들어졌습니다. 앞으로도 아버지의 자랑이 될 수 있도록 더 성장하겠습니다.

2021년 2월
김창우