



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 석 사 학 위 논 문

댐퍼 및 원치 시스템 기반
선박접안시스템 구축에 관한 연구



2018년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계시스템 및 조선공학과

김 창 우

공 학 석 사 학 위 논 문

댐퍼 및 원치 시스템 기반
선박접안시스템 구축에 관한 연구

지도교수 김 영 복

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계시스템 및 조선공학과

김 창 우

김창우의 공학석사 학위논문을 인준함

2018년 2월



주 심 공 학 박 사 정 석 호 (인)

위 원 공 학 박 사 TRAN DUC
ANH MINH (인)

위 원 공 학 박 사 김 영 복 (인)

목 차

Abstract	iii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 관련 기술 및 개발 현황	3
1.3 연구목적	4
제 2 장 선체 운동 이론	6
2.1 좌표계와 변수	6
2.2 선박 운동의 수학적 표현	8
제 3 장 모델링 및 제어기 설계	11
3.1 댐퍼의 시스템 모델링 및 제어기 설계	11
3.2 원치 시스템 모델링 및 제어기 설계	12
3.2.1 원치 시스템 모델링	13
3.2.2 원치 시스템 제어기 설계	15

제 4 장 실험 및 고찰	18
4.1 실험방법	18
4.2 실험결과 및 고찰	22
4.2.1 1조의 댐퍼와 원치 협조제어 실험 및 고찰	22
4.2.2 2조의 댐퍼와 원치 협조제어 실험 및 고찰(평행한 상태)	25
4.2.3 2조의 댐퍼와 원치 협조제어 실험 및 고찰(임의의 각도)	30
4.3 향후 연구 계획	34
제 5 장 결론	35
참고문헌	36
[별첨1] Nomenclature	38
[별첨2] 주요 실험장치 구성품	39

A Study on the Construction of Vessel Berthing System by Damper-Winch cooperation

Chang-Woo Kim

*Department of Mechanical System Engineering and
Naval Architecture Marine System Engineering,
The Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

Vessel berthing is defined entire processing which vessel is closing next to a pier in port or harbour, it is known as the most difficult and complex process in the total ship operating. Vessel berthing utilizes a main propulsion to main power source and is supplied with side thruster or tugboat. A modernized vessel or a special purpose vessel utilizes an azimuth thruster to vessel berthing more intelligently even if the vessel has '0' speed. However, most of the normal ships are less active when berthing by the limitation of

fixed direction propulsion system.

It has been a long time since the automation of port management system and the modernization of vessel had been started and operated. However, it is a fact that the vessel berthing has not been exceeded the primitive level until the present. Even if the vessel is equipped with high-tech equipments to help when berthing, there are profound technical difficulties for the safely automatic vessel berthing to the final step. For example, in the case of the system developed by CAVOTEC company, it is dependent on the berthing-support system installed on the port to berth of final operating.

This study purposes to overcome the limit of vessel berthing and to develop technology for making alternative environment which carry out berthing more safety and faster.

In other words, we would like to develop a technology for building a more reliable berthing support system in place of the classical ship berthing system using a tugboat.

This study proposes a robust system that can quickly and safely berth using a damper and a winch on the port without using the vessel propulsion unit. This is to establish a construction of vessel berthing system by damper-winch cooperation, so that it is vessel berthing perfectly without support of a tugboat.

We plan to evaluate and verify the effectiveness of this berthing system through a simplified model ship and quay (including damper-winch) water tank experiment.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

선박 접안은 항해를 마치고 입항하는 선박이 안벽에 접안하는 것이며, 선박의 전 운영 과정에서 가장 까다로운 작업으로 분류된다. 어선을 포함한 소형 선박이나, 자력 도선이 가능한 장비를 갖춘 선박을 제외한 선박들, 특히 대형 선박들은 예인선의 지원과 접안하고자 하는 항만의 도선사의 도움을 받아야만 접안이 가능하다. 이러한 기존의 선박 접안 방식은 선박의 주 추진기 및 윈치, 선박에 따라서는 사이드스러스터를 동력으로 사용한다.^{[1][2]}

그리고 선박 접안 시, 선박운동제어에는 많은 제약이 존재한다. 즉, 선박은 거대하고 상당한 질량을 가진 물체이고 선박 고유의 선회 반경이 확보되어야 하는 고유의 운동 특성이 있다.^[3]



Fig. 1-1 Ship berthing with assistance tugboats

선박 접안 시, 이러한 선박운동제어의 특성으로 인해 좁은 항내에서 선박의 접근 방향과 그 이동이 제한된다. 이때 선박의 조정 성능 보완을 위한 예인선의 지원은 선박의 횡이동에서 필수적인 요소이다.^[4] 또한, 선박 접안이 완료 되는 시점에서의 선박의 방향은 선수와 선미의 방향이 안벽과 평행해야 한다.

기존의 선박 접안 방식은 해당 항구의 접·이안 경력이 많은 선장 또는 도선사의 육성에 의한 지시와 예인선의 협조를 통해 다양한 외란으로부터 접안을 안전하게 수행될 수 있도록 해왔다. 접안 과정 중에 파도, 바람, 해류 등의 외란의 영향으로 선체와 선박의 조타기는 끊임없이 영향을 받게 된다. 이로 인해 선박의 타수는 선장 또는 도선사의 지시에 따라 접안에 필요한 침로를 유지하기 위해 계속 수동으로 타를 조작해야한다.

이러한 기존 선박 접안 방식에는 기관 고장에 의한 선박 통제력 상실, 선박과 예인선 그리고 항만과의 통신 오류, 조작자의 실수 등으로 인한 사고의 위험성이 항상 내재되어 있다.

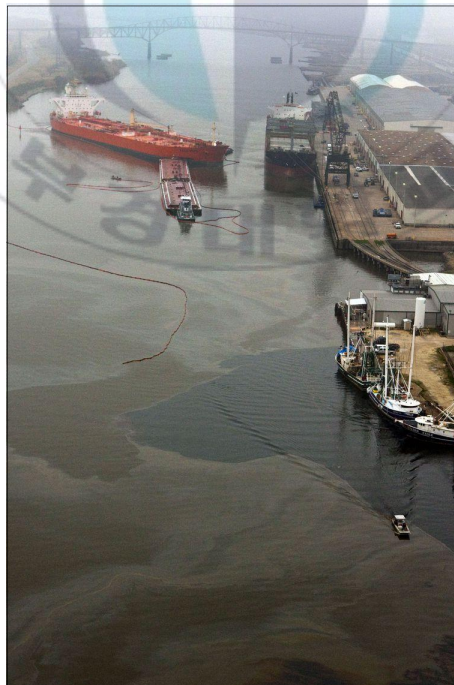


Fig. 1-2 Oil spill due to vessel collision in port

실제로 항내에서의 선박과 선박, 선박과 항만 시설의 충돌 사고가 끊임없이 발생해 왔다. Fig. 1-2는 미국 텍사스 아서(Arthur)항에서 발생한 유조선과 바지선의 충돌 사고 사진이다. 충돌로 인해 170만 리터의 기름이 유출되었으며, 이로 인한 방제작업이 진행되는 동안 해당 항구는 통제되었다. 이처럼 선박 충돌 사고는 단순한 충돌로 인한 손상뿐 아니라 선박에서의 기름 유출과 항만 시설 손상으로 인한 부두 폐쇄 그리고 인명 피해 등의 2, 3차 추가 사고 가능성이 있다. 또한, 이로 인한 경제적 손실은 경중의 차이가 있지만 대부분의 선사가 해당 선박을 운용하기 힘든 수준일 만큼 상당한 액수이다.

최근 선박을 운영하는 선사들의 가장 큰 화두는 비용 절감을 통한 경쟁력 확보일 것이다. 선박 운용비용을 줄이는 방법에는 선박의 효율적인 운항을 통한 연료비 절감과 운항 시간의 단축이 대표적이다. 그리고 예방 정비를 통한 선박 운항 상태 최적화, 사고 예방, 도선사의 보조 및 예인선의 지원과 같은 각종 부대비용 절감도 그 방법 중 하나이다.

본 연구에서는 항내에서의 선박 접안에 대해 고찰하였다. 선박 접안에 제어 기술을 접목하여 도선사 별로 상이한 접안 시간과 접안 안정성의 정도 등 기존의 접안 방식의 불안정한 부분을 보완 하고자 한다. 즉, 선박이 안전하고 신속하게 접안 할 수 있는 자동 접안 시스템에 대해 고찰하고자 한다.

1.2 관련 기술 및 개발 현황

선박 자동 접안 방법에 관한 연구는 1990년 초반부터 많은 연구자들에 의해 수행되어왔다. 선박이 대양에서 제한된 수역인 항구로 이동하면 상당수의 유체 역학적 계수가 변하게 된다. 이 때문에 많은 연구자들은 동적 모델의 독립적인 지능형 제어 전략을 개발하려고 하였다. 이를 위해 연구자들은 선박의 접안 시스

템 구축을 위해 퍼지 이론^[5] 및 인공신경망 제어 이론^{[6][7]} 등을 사용하였다. 또 다른 선박 접안에 관한 연구는 최적과 적응 제어 이론을 사용한 연구이다.^{[8][9]} 연구자들은 선박 충돌 회피 시스템 구축을 통해 선박 자동 피항 알고리즘을 분석하고 접이안에 필요한 제어 알고리즘의 개발에 중점을 두었다. 이들 연구를 통해 수치 시뮬레이션을 수행하여 소정의 성과를 거두기도 하였다.^[10] 그러나 이러한 방법들은 선박 접안에서 중요시 되는 안전성에 대한 보장을 하지 못하는 맹점이 있었다.

이미 개발되어 사용되고 있는 최신의 선박접안시스템의 대표적인 것으로는 CAVOTEC社의 Semi-active fender system이 있다. 이 시스템은 선박을 안벽까지 약 1.5m 이내 까지는 기존의 접안 방식으로 선박을 이동시킨 후, 육상에 설치되어 있는 'Vacuum pad' 장치를 이용하여 선박을 안벽에 신속하게 접안 시키는 기술이다. CAVOTEC社의 선박 접안 시스템은 기술적인 관점에서 초기에 예인선의 지원을 필요로 하게 되고, 선박 접안 가이드가 거리 약 1.5m로 짧으며, 안벽에 설비가 고정되어야 하는 등의 한계를 가지게 된다. 이러한 한계점 때문에 해당 기술은 완전한 자율 접안 시스템이라고 볼 수는 없다.

1.3 연구목적

본 연구에서는 신속하고 안전한 자동 접안 환경 구축을 위한 선행 기술개발에 목표를 두고 있다. 이를 위해 기존 자동 접안 기술인 CAVOTEC社의 기술적인 한계에 대해 분석하고 극복 방안에 대해 고찰하였다.

선박이 항내에 진입을 하여 자력으로 안전하게 접근할 수 있는 거리까지 접근을 하고, 선박의 동력이 아닌 육상의 동력을 이용하여 선박이 안벽까지 자동으로 접안시킬 수 있는 기술이 선박 자동 접안의 목적이다. 이를 위해 본 연구에서는 안벽의 댐퍼와 윈치시스템에 대한 모델링을 하고 댐퍼와 윈치로 구성된 협조제어시스템 구

축을 통한 선박 접안 방식에 대해 제안한다.

제안된 선박접안시스템의 모형을 제작하여 수조 실험을 통해 제안된 시스템의 유효성을 검증 하고자 한다.



제 2 장 선체 운동 이론

2.1 좌표계와 변수

선박 운동 방정식을 도출하기 위해 필요한 좌표계와 변수를 Fig. 2-1과 Table.2-1에 나타내었다. X, Y, Z 와 u, v, w 그리고 x, y, z 는 각 방향에 대한 힘, 선속도, 위치를 나타내고, K, M, N 과 p, q, r 그리고 ϕ, θ, ψ 는 각 축에 대한 모멘트, 각속도, 각도를 나타낸다.

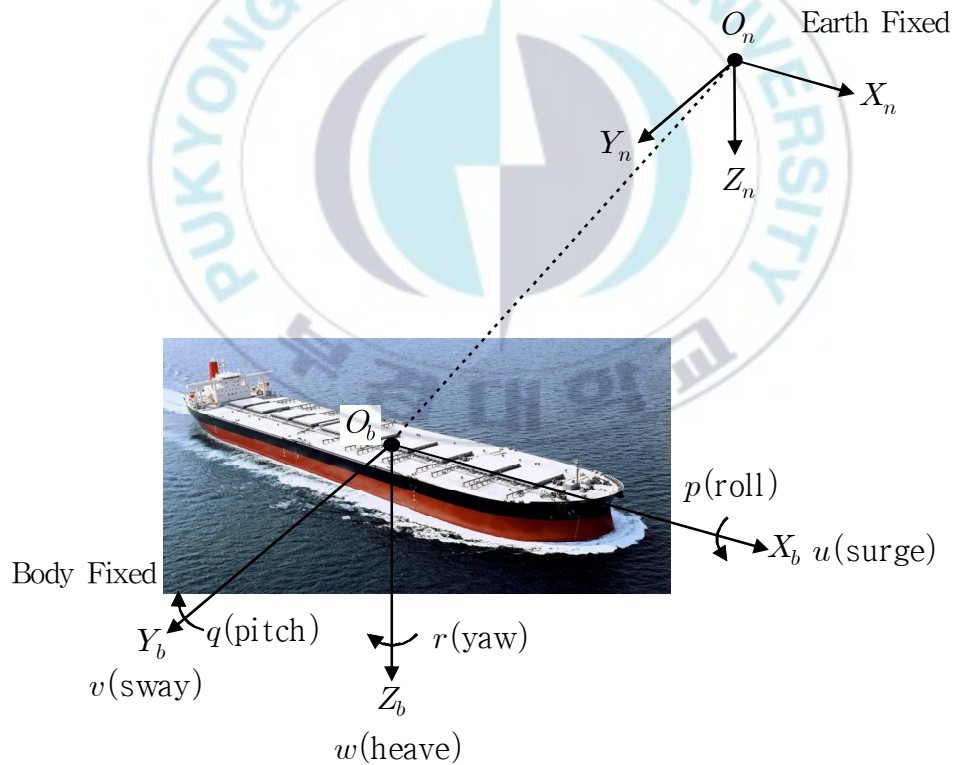


Fig. 2-1 Motion variables for a marine vessel

Table 2-1. The notation of SNAME for 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(yaw)	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

선박 운동을 해석할 때 두 가지 좌표계를 도입하여 나타내면 선박 운동에 대한 표현이 용이해 진다. 첫 번째는, 지구좌표를 기준으로 하는 O_n, X_n, Y_n, Z_n 지구고정좌표계이다. 혹은 North-East-Down(NED)좌표계라고 한다. 좌표계의 각 축은 다음 정의된 방향을 양의 값으로 한다.

- X_n 축 : 지구의 북쪽 방향
- Y_n 축 : 지구의 동쪽 방향
- Z_n 축 : 지표면과 수직으로 들어가는 방향

두 번째로, 선체에 좌표축이 고정된 O_b, X_b, Y_b, Z_b 선체고정좌표계가 있다. 이는 계산상의 편의를 위해 무게중심점에 원점을 두고 있다. 좌표계의 각 축은 다음과 같이 정의된다. 여기서 괄호 속의 방향이 양의 값을 나타낸다.

- X_b 축 : 선체의 종방향 (선미에서 선수 방향)
- Y_b 축 : 선체의 횡방향 (좌현에서 우현방향)
- Z_b 축 : 선체와 수직방향 (위에서 아래 방향)

2.2 선박 운동의 수학적 표현

선박 접안과 같이 저속으로 운항하는 경우에 있어서, 선박의 동력 없이 육상의 댐퍼와 윈치만으로 조종되는 제어대상을 고려한다. 단, 본 연구에서는 평면상의 운동을 고려하기 때문에 서지(surge), 스웨이(sway) 그리고 요우(yaw)방향의 운동만 고려한다. 그리고 대상 시스템이 다음 조건을 만족할 때,

1. 선박의 중심선을 선체고정좌표계의 원점으로 한다.
2. 선체 질량은 균일(homogenous)하고 XZ평면은 대칭(symmetric)이다.

선박의 운동 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.^[11]

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

여기서 $\eta = [x, y, \psi]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표계에서의 위치(x, y)와 각도 ψ 에 대한 관성위치를 나타낸다. $\nu = [u, v, r]^T \in R^3$ 는 선체고정좌표계에서 서지, 스웨이 그리고 요우방향 속도를 의미한다. 그리고 $R(\psi)$ 는 선박좌표를 관성좌표로 변환시키는 변환행렬로 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 부가질량을 포함한 관성행렬이고,

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

m 은 선박 질량, I_z 은 선박의 z 축에 대한 관성 모멘트, X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 은 유체 동역학적 부가질량을 나타낸다. $D \in R^{3 \times 3}$ 은 감쇠행렬이고 X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 은 선형 감쇠계수를 나타낸다.

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

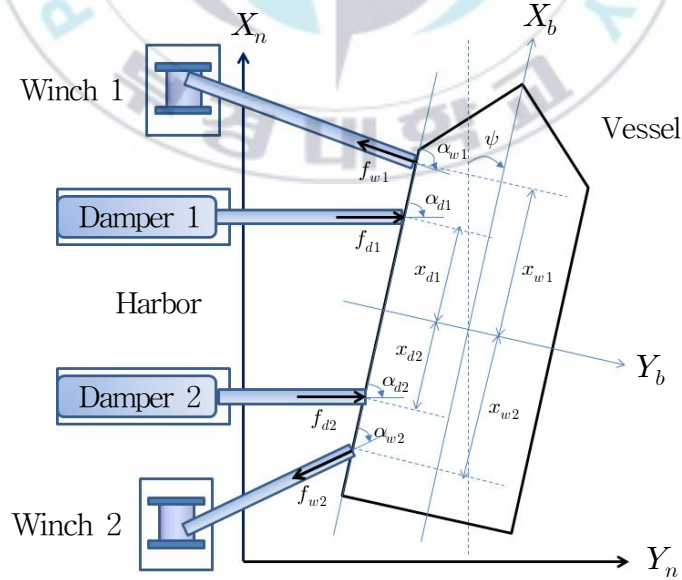


Fig. 2-2 Ship motion with the assistance of damper and winch system

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

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

로 다시 쓸 수 있다. 여기서 $f = [f_{D1}, f_{D2}, f_{W1}, f_{W2}]^T$ 은 Fig. 2-2에 나타냈듯이 선박에 작용하는 댐퍼와 윈치의 각 힘을 나타낸다. 단, 본 연구에서는 각 액추에이터의 특성상 윈치는 당기는 힘, 댐퍼는 미는 힘을 사용한다. 즉, 액추에이터는 단방향성을 고려한다.

선박과 액추에이터의 기하학적 구성은 $T(\alpha) \in R^{3 \times 4}$ 으로 나타낸다. 여기서 액추에이터의 작용 힘과 선체고정좌표계 상의 축이 이루는 각도를 α_{ij} 라고 하고, 시계방향을 양의 값으로 둔다. 그리고 선체고정좌표계의 원점을 기준으로 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 나타내어진다.

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

제 3 장 모델링 및 제어기 설계

3.1 댐퍼 시스템 모델링 및 제어기 설계

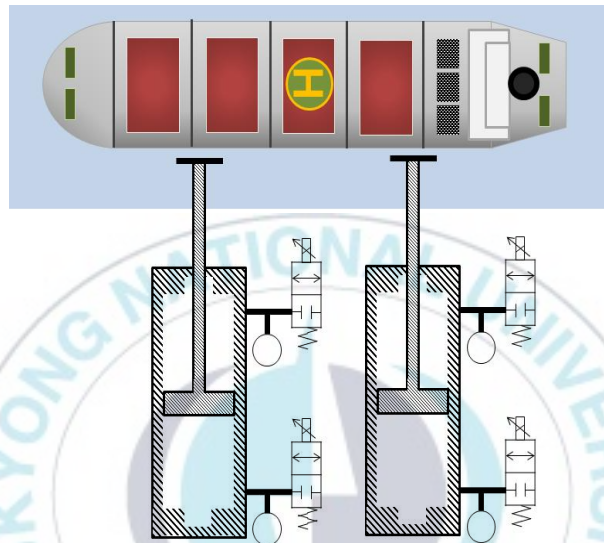


Fig. 3-1 Damper system

Fig. 2-2의 댐퍼는 Fig. 3-1과 같은 공압 실린더로 구현하였다. 그리고 트럭에 장착되어 항만 내 여러 안벽에 적용될 수 있도록 이동성을 확보 하였다. 본 연구에서 제안한 새로운 접안 방식은 육상에 설치된 원치로 선박을 적절히 당길 때 댐퍼가 완충작용을 하며 접안을 완료한다. 접안 시 댐퍼의 반력이 적절히 유지되어야 한다. 이때 댐퍼압력조절밸브의 개·폐를 적절히 조절하여 선박이 과한 속력으로 안벽에 접근하지 않도록 해야 한다. 단, 댐퍼는 안벽에 고정되어 있지 않고 유동성을 지닌 채 선박에 미치는 힘을 작용한다. 선박은 파도 및 바람의 영향에 의해 상하 혹은 전후 방향으로 요동 할 수 있다. 이 때 댐퍼는 선박이 갑작스레 안벽으로 이동하는 것을 방지하는 역할을 한다. 본 연구에서 댐퍼는 단방향성을 갖는 시스템으로 고려한다.

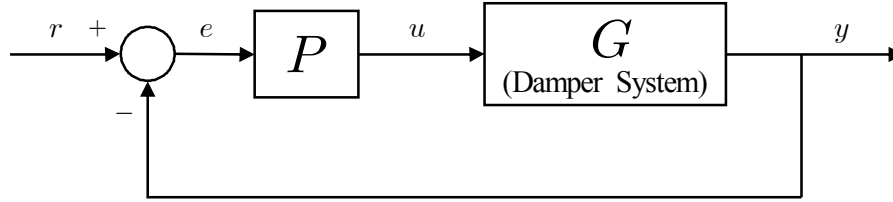


Fig. 3-2. Block diagram of damper control system

Fig. 3-2는 댐퍼 제어 시스템을 나타낸다. r 은 기준입력, e 는 기준입력과 출력과의 오차, P 는 비례제어기, G 는 플랜트(Damper system), y 는 출력을 의미한다. 선박 접안 작업 시 급변하는 바람 혹은 파도와 같은 외란으로 인해 댐퍼에 허용 압력 이상 작용할 수 있다. 따라서 Fig. 3-2와 같은 제어계를 도입하여, 댐퍼 압력 값을 입력신호로 인가하고 시스템 출력이 기준신호를 넘지 않도록 조절한다. 본 연구에서는 현장 시스템 구현에 용이하고, 현장 사용자가 선박 규모에 따라 쉽게 수정·보완 할 수 있는 비례제어기를 도입하였다. 설정한 제어기 계수는 반복 실험을 통해 적절한 값으로 선정하였다.

3.2 원치 시스템 모델링 및 제어기 설계

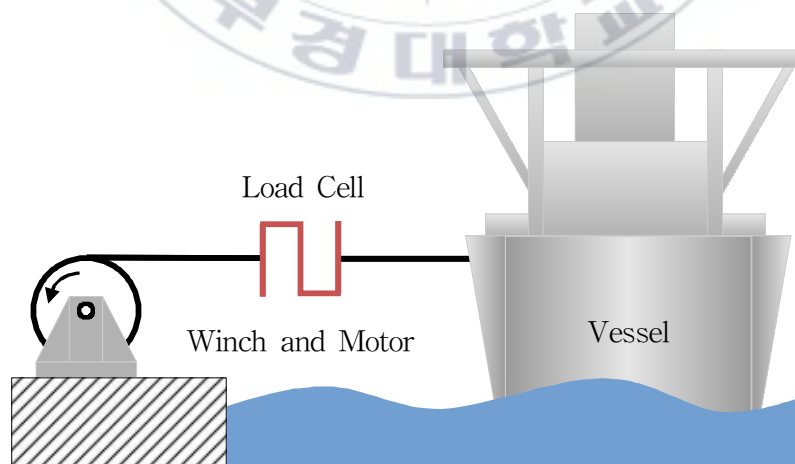


Fig. 3-3 Winch system

3.1장에서 언급되었듯이 윈치는 선박이 안벽으로 서서히 이동하도록 선박을 적절한 힘으로 당긴다. 이에 따라 선박은 댐퍼의 완충력과 윈치의 당기는 힘에 의해 횡방향으로 이동한다. 즉, 윈치는 횡방향 기준경로를 오차 없이 추종하도록 해야 하고, 윈치 로우프의 장력은 댐퍼 완충력과 함께 적절한 수준을 유지되어야 한다. 윈치 로우프는 선박의 선수·선미 혹은 대형선박의 경우 갑판 여러 지점에 결박된다. 윈치 시스템의 특성상 단방향성을 갖는 것으로 고려한다. 이 가정은 두 가지 액추에이터가 접안의 시작부터 완료까지 적정 압력 이상으로 유지된다면 항상 선박에 힘을 작용하기 때문에 유효하다. 연구에 사용된 윈치 모터의 경우, 앞으로의 추가적인 연구에서 다양한 선박 조건으로 실험 할 수 있도록 그 사양에 필요한 양보다 더 높게 선택하였다.

3.2.1 윈치 시스템 모델링

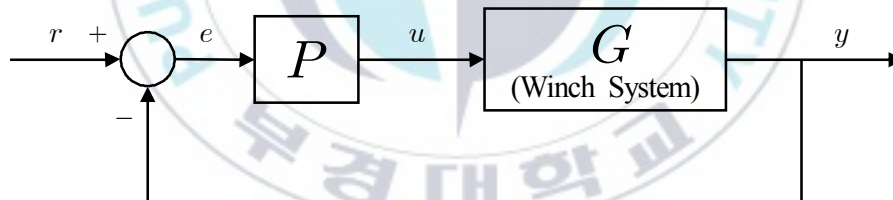


Fig. 3-4. Block diagram of winch system

윈치 시스템의 모델링 과정은 윈치에 입력을 가하였을 때 선박 위치 변화가 입력과 어떤 상관관계가 있는지 알아내는 과정이다. 본 연구에서는 복잡하고 까다로운 수학적 접근이 아닌 실험적 방법을 선택했다.

윈치의 제어입력과 선박 위치의 상관관계를 알아내기 위해 Fig. 3-4와 같은 페루프 비례제어계를 구성하였다. 기준입력 30[deg]을 인가하고 시스템 출력을 계측하였다. 비례제어 계수 선정을 위해 정착시간 5초 , 오버슈트 0% 의 성능

을 기준으로 하고 $P=0.05$ 로 설정하였다. Fig. 3-5는 수집된 제어입력을 나타내며, Fig. 3-6은 윈치 시스템 출력을 나타낸다. 해당 데이터를 기반으로 Matlab identification tool을 이용하여 전달함수 및 상태방정식을 도출하고 Fig. 3-7과 같이 비교하였다. 즉, Fig. 3-7 그래프에서 실선으로 표시된 data(y1) 값은 윈치 시스템의 페루프 응답 곡선을 나타내고, tfe(transfer function estimation) 곡선은 Matlab identification tool을 통해 도출한 전달함수에 Fig. 3-5의 제어입력을 인가한 값이다. sse(state space estimation)곡선의 경우, 위와 같은 방법으로 도출한 상태방정식의 응답곡선이다.

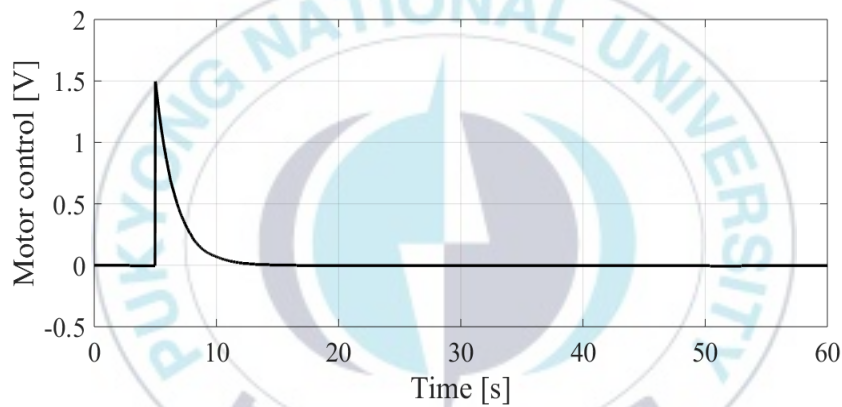


Fig. 3-5 Winch motor control input

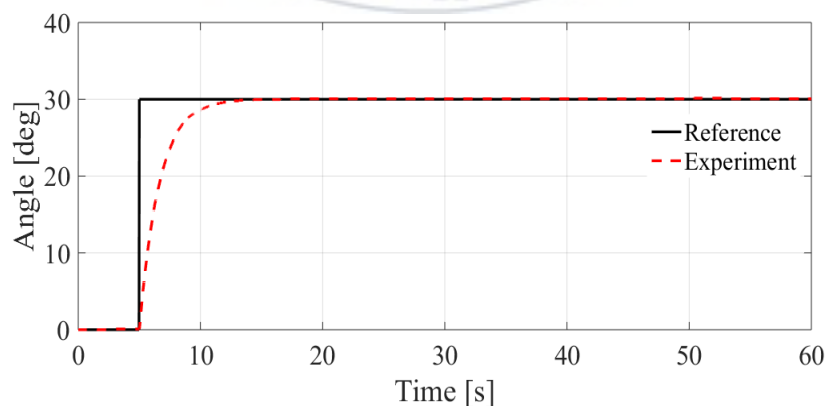


Fig. 3-6 Winch drum angle

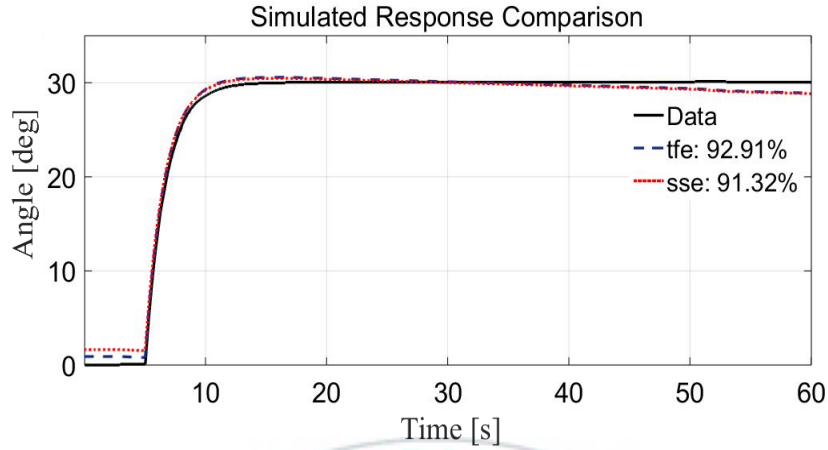


Fig. 3-7 Winch simulation response comparison

3.2.2 윈치 시스템 제어기 설계

본 연구에서는 윈치 로우프가 선박에 결박된 상황에서 선박이 접안기준경로를 오차 없이 추종할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 따라서 제어대상의 변동이나 스텝상의 외란에 의해 발생하는 제어오차가 정상상태에서 0으로 되도록 하는 적분형서보계를 도입한다. 3.2.1장에서 도출한 윈치 시스템은 Fig. 3-6처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{cases} A = -4.389e-11, B = 11.71, \\ C = 1, D = 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

실험에서 출력값을 Matlab을 사용하여 동정하는 방식으로 전달함수를 구하였

다. 적분형서보계를 설계하기 위해 새로운 변수 $z_i = [x \ x_i]^T$ 을 도입하였다. x_i 는 적분기를 지난 오차신호를 의미한다. 따라서 적분형서보계의 상태방정식은 다음과 같이 된다.^[12]

$$\begin{aligned}\dot{z}_i &= A_i z + B_i u_i \\ y &= C_i z\end{aligned}\tag{3-3}$$

여기서,

$$A_i = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_i = [C \ 0].\tag{3-4}$$

이다. 식 (3-3)의 (B_i, A_i) 조가 제어가능이라면, 이 시스템이 안정하도록

$$u_i = -kz_i = -[k_i \ k_c][x_i \ x]^T\tag{3-5}$$

의 형태를 갖는 상태피드백을 선택한다.

적분형서보계의 기본적인 블록선도는 Fig. 3-8과 같다.

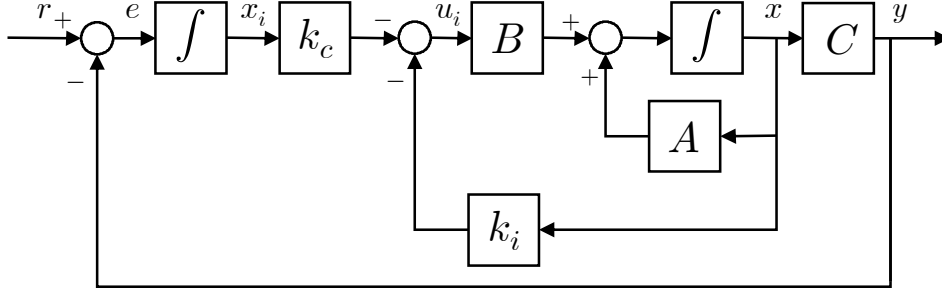


Fig. 3-8 Block diagram of servo-system for berthing

$(A_i - B_i k)$ 을 안정하게 하는 게인 값 $[k_i \ k_c]$ 은 극 배치 기법을 이용하여 선정했다. 적분형서보계를 설계함에 있어서 시스템 성능 기준을 3.2.1장과 동일하게 적용하였다. 따라서 시스템 극값은

$$\begin{cases} p_1 = -6 \\ p_2 = -8 \end{cases} \quad (3-6)$$

로 선정하였고, 이에 따라 계산된 피드백 게인 값은 다음과 같다.

$$k = [k_i \ k_c]^T = [1.1956 \ -4.0991]^T \quad (3-7)$$

제 4 장 실험 및 고찰

4.1 실험방법

Fig. 4-1은 실험 장치를 나타내고 있다. 선박의 선수와 선미위치에 한 쌍의 댐퍼와 윈치 시스템이 고정되어 접안 시스템을 구성한다. 이때, 선박의 위치는 안벽에 설치되어 있는 레이저 센서(Laser sensor)로 측정하며, 안벽에 선박이 완전히 접안했을 때의 값을 '0'으로 조정하였다. 댐퍼는 이동식으로 접안 시스템에 제안되었지만, 실험의 편의성을 위해 안벽에 고정하여 실험을 진행하였다.

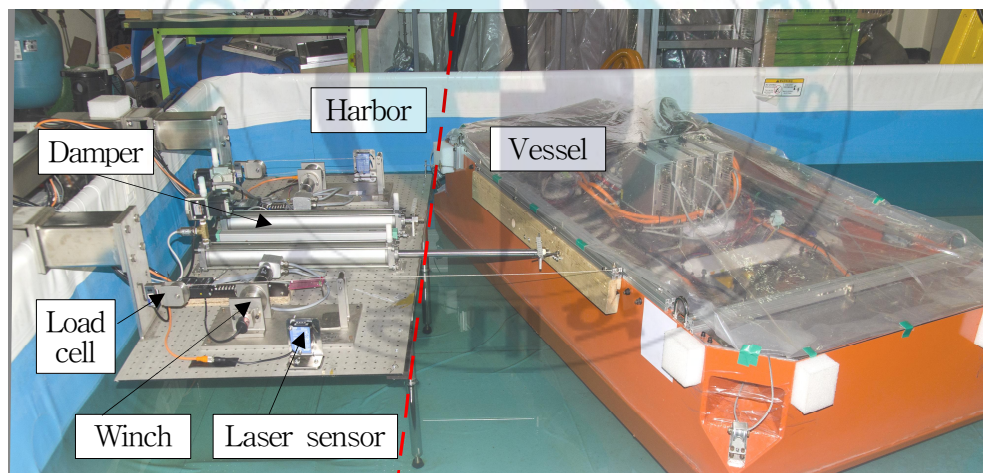


Fig. 4-1 Configuration of experiment system

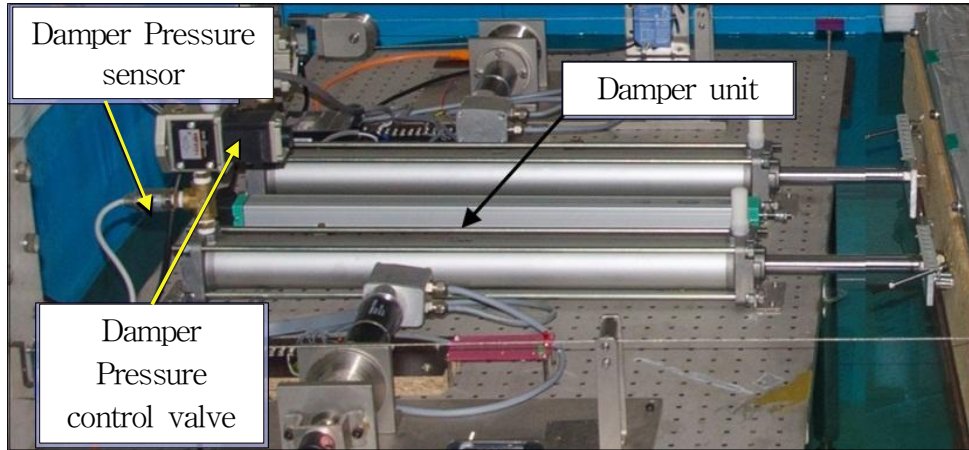


Fig. 4-2 Photo of damper system configuration

Fig. 4-2는 댐퍼 시스템의 실험 장치를 나타낸다. 댐퍼는 공압 댐퍼를 사용하였으며, 내부에 걸리는 압력을 계측하는 압력센서(Pressure sensor)와 내부 압력을 조절하는 댐퍼압력조절밸브(Damper pressure control valve)와 함께 구성되어 있다. 댐퍼는 접안하고자 하는 선박이 접안기준경로를 따라 제어될 때 원치로 당겨지는 힘의 반대방향으로 단방향 제어된다. 댐퍼는 선박이 접안기준경로를 추종함에 있어서 선체 동요나 오버슈트와 같은 갑작스런 움직임에 대한 보완 역할을 한다. 즉, 선박과 접촉된 댐퍼의 압력이 헌팅 할 경우 선박이 순간적으로 강한 힘을 받는 상황이 발생이 되므로 이를 방지하기 위해 댐퍼의 압력은 20[Kpa]을 최대치로 설정하여 계측되는 댐퍼 내부의 압력을 댐퍼압력조절밸브의 개·폐를 통해 유지 될 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 필요한 설정 값을 실험적인 방법을 통해 모델링하였다. 댐퍼압력조절밸브는 밸브에 걸리는 입력전압이 1.5V일 때까지 닫혀있는 상태로 설계되었으며, 그보다 입력전압이 높여주면 댐퍼압력조절밸브가 열리게 되고 댐퍼 내부 압력에 따라 전압신호를 주는 것으로 밸브는 제어된다. 댐퍼 내부에 걸리는 압력계측에 사용된 압력센서는 최대 1[Mpa]까지 계측 가능한 제품을 사용하였다.

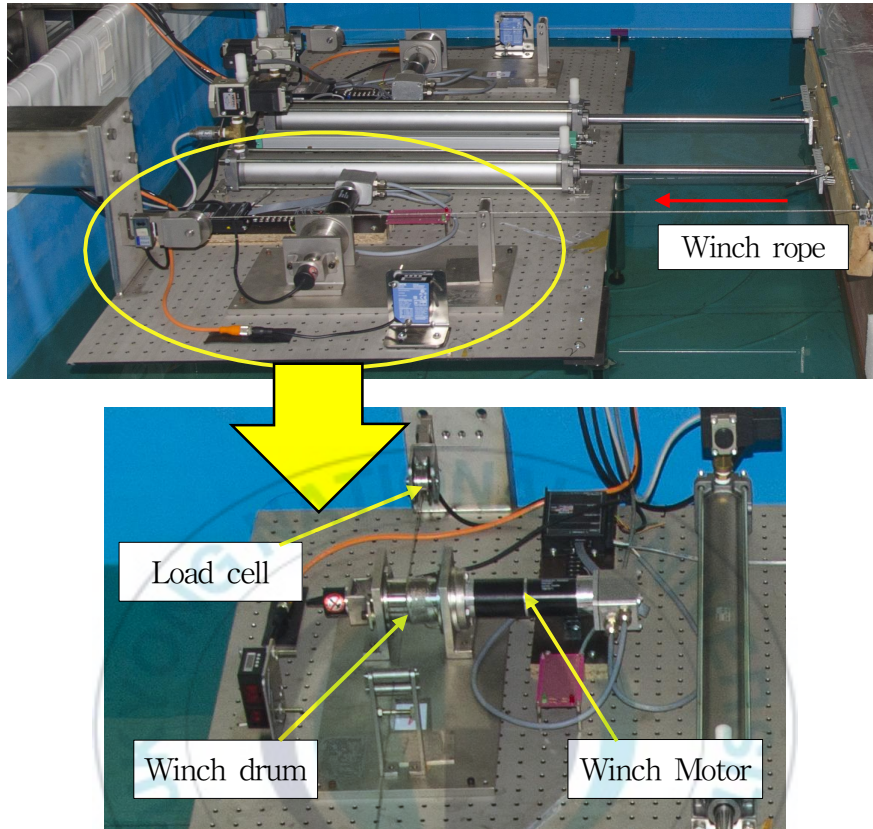


Fig. 4-3 Photo of winch system configuration

원치 장비는 원치 로우프와 그 장력을 계측하는 Load Cell, 원치 로우프가 감겨 있는 원치 드럼, 그리고 이 드럼의 움직임을 제어하는 모터로 구성하였다. 모터는 레이저센서로 계측되는 선박의 위치에 따라 원치드럼의 각도를 조정하여 원치로프를 당기는 역할을 한다. 원치 시스템은 집안하고자 하는 선박이 설정한 집안기준경로를 기준 시간인 150[s]에 맞추어 추종할 수 있도록 제어된다. 이때의 원치 로우프의 장력은 60[N]을 최대치로 설정하였다. 원치모형실험의 목표는 원치 로우프의 장력이 최대치를 넘지 않으며 일정하게 유지되도록 원치 모터를 제어하는 것이다. 사용된 Load Cell 장치는 490[N]까지 계측이 가능한 제품을 사용하여 제어하였다.

제안된 댐퍼와 윈치로 구성된 협조제어시스템의 유효성 평가를 위한 실험은 크게 3가지로 시행된다. 첫 번째, 모델링된 댐퍼와 윈치 시스템의 정상 작동여부를 판단하게 위해 선박의 선미부분을 고정한 상태로 한쌍의 댐퍼와 윈치만으로 선박접안 실험을 시행한다. 두 번째, 안벽과 평행한 상태로 떨어진 선박을 접안 시키는 실험이다. 이 실험에서는 동일한 위치만큼 떨어져 있는 각각의 댐퍼와 윈치 시스템이 서로 정상적으로 확인한다. 세 번째, 암벽과 임의의 각도를 유지한 상태로 안벽과 떨어진 선박을 접안 시키는 실험이다. 이는 본 연구에서 제안된 댐퍼와 윈치로 구성된 협조제어시스템이 안벽의 선박의 선수와 선미방향에서 정상적으로 작동하여 자동접안이 완성되는지를 실험으로 그 유효성을 평가하기 위한 최종 단계의 실험이다. 선박접안 시 시작부터 완성까지 기준이 되는 경로는 Fig. 4-4에 그래프로 나타내었다. 수조 실험의 모형 선박은 안벽과 0.52[m]만큼 떨어진 상태에서 기준 시간 150[s]동안 설정한 접안기준경로를 추종하도록 하는 실험을 반복하였다.

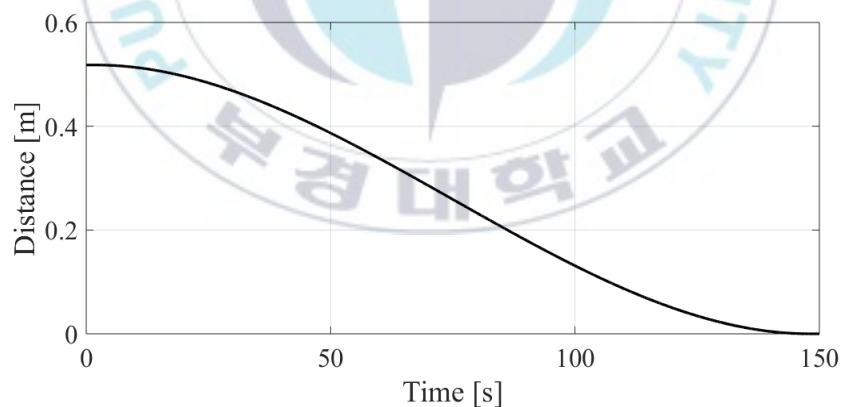


Fig. 4-4 Reference route of vessel berthing

4.2 실험결과 및 고찰

4.2.1 1조의 댐퍼와 윈치 협조 제어 실험 및 고찰

해당 실험은 앞서 언급한대로 댐퍼와 윈치 시스템 모델링의 정상 여부를 판단하는 실험이다. 모형 선박의 선미 부분은 안벽에 고정된 상태에서 실험을 시행하였다. 그 결과 제안된 접안시스템의 댐퍼는 Fig. 4-5에 나타난 그래프와 같이 설정 압력인 20[kPa]을 넘지 않도록 댐퍼압력조절밸브가 개·폐되는 것을 확인하였다. Fig. 4-6은 댐퍼압력 변화를 입력신호로 받아 열리도록 전압을 높여 신호를 주도록 제어되는 것을 그래프로 보여준다.

이때의 윈치 로우프의 장력은 Fig. 4-7에 나타난 것처럼 설정한 장력인 60[N]을 넘지 않는 것을 확인하였다. 접안이 시작되고 150[s]후 완성될 때까지 선박은 접안기준경로를 Fig. 4-8과 같이 추정하였으며, 이때의 위치 오차는 Fig. 4-9에 나타난 것처럼 4[mm] 이내로 추종되는 것을 확인하였다. 그 결과, 댐퍼와 윈치로 구성된 협조제어시스템이 정상적으로 작동되는 것을 확인할 수 있다.

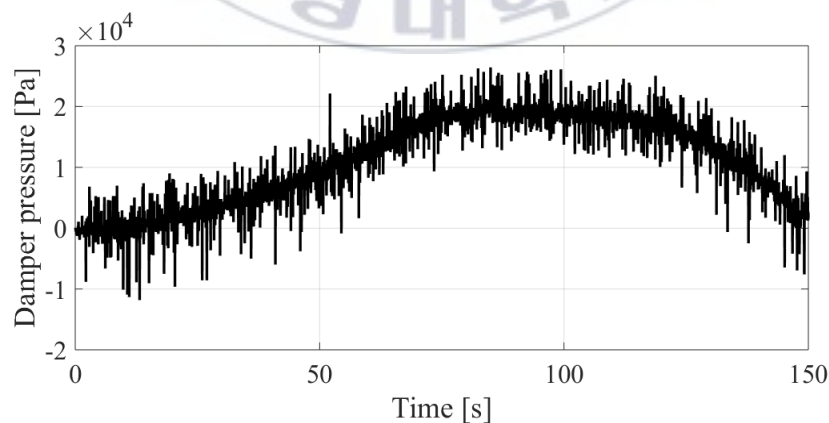


Fig. 4-5 Damper pressure

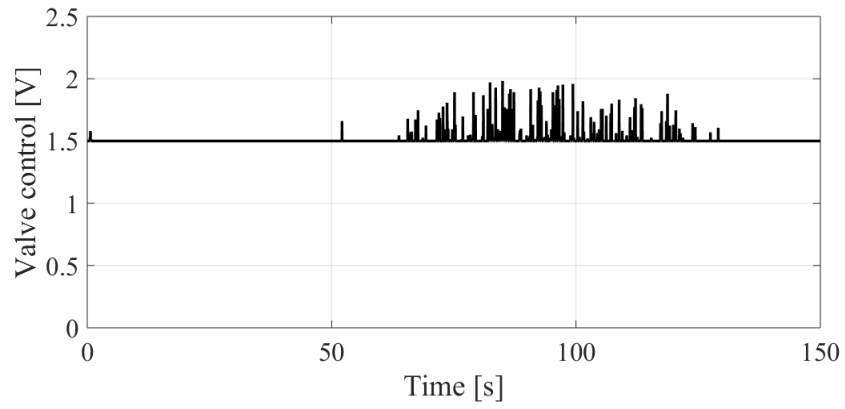


Fig. 4-6 Damper valve control

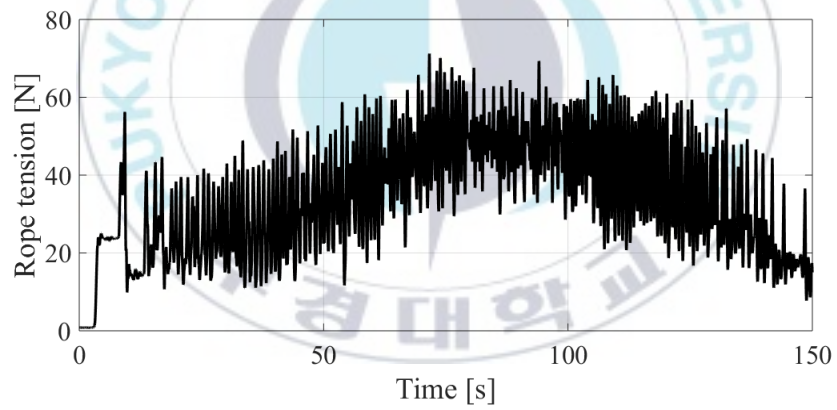


Fig. 4-7 Winch rope tension

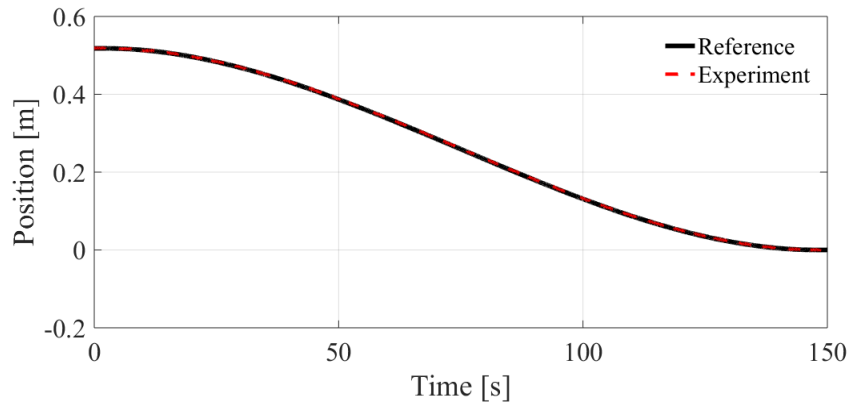


Fig. 4-8 Vessel position

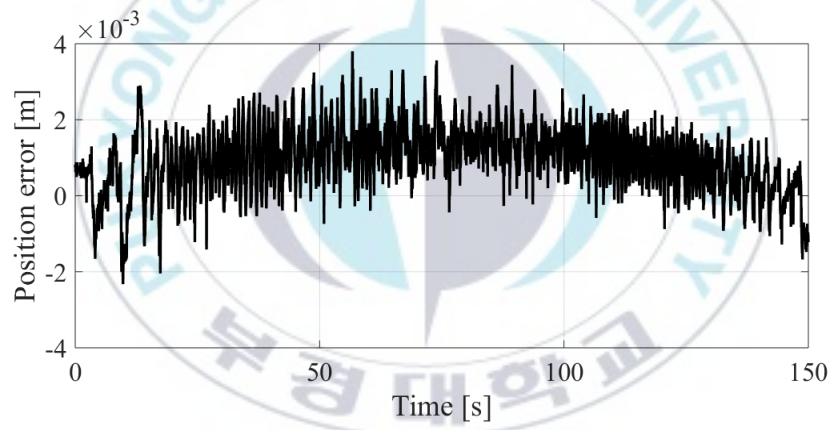


Fig. 4-9 Vessel position error

4.2.2 2조의 댐퍼와 윈치 협조 제어 실험 및 고찰(평행한 상태)

제안된 접안 시스템을 모형 선박의 선수와 선미 위치의 안벽에서 동시에 정상 작동하는지를 확인하는 실험이다. 선박을 안벽과 평행한 상태로 0.52[m] 떨어진 위치에서 실험을 시작하였다. Fig. 4-10과 같이 실험 장치를 준비하였다.

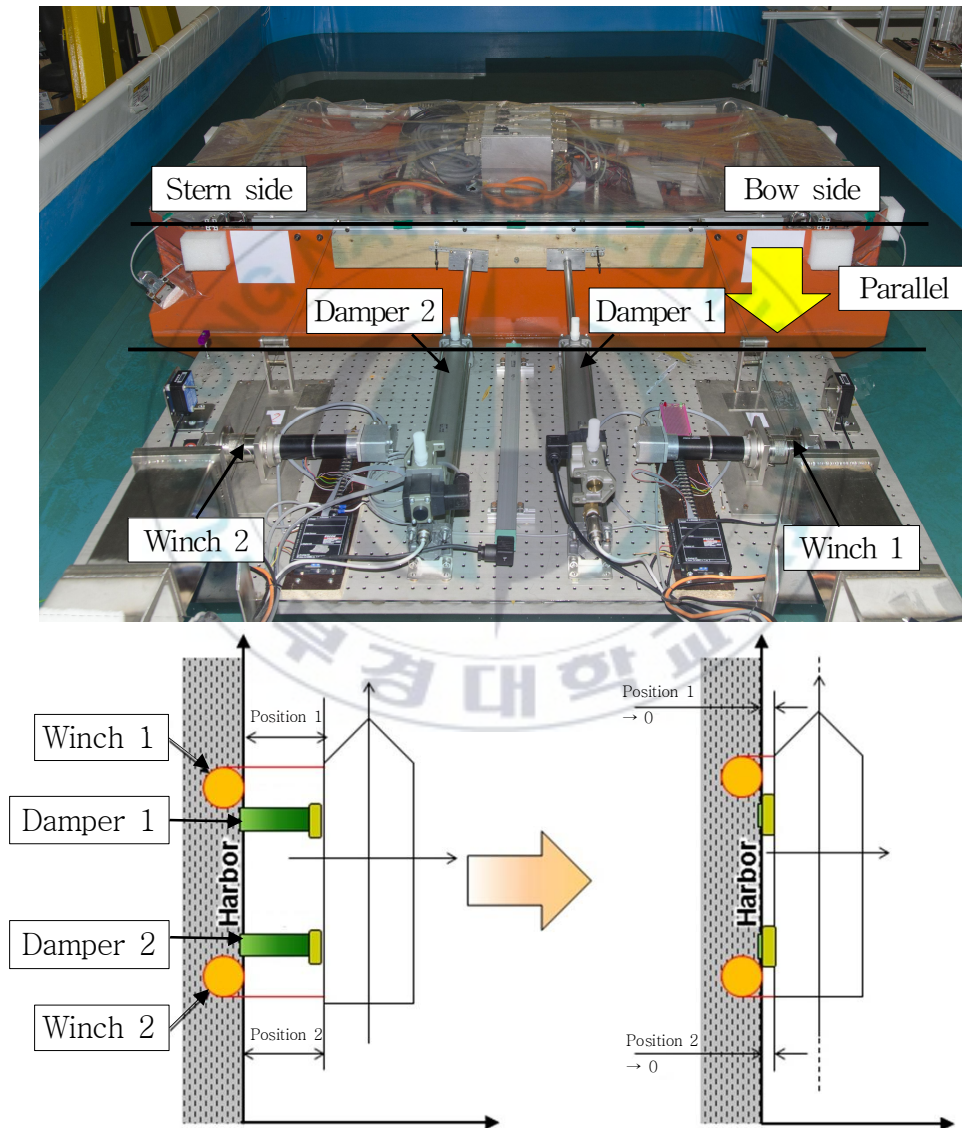


Fig. 4-10 Parallel berthing experiment with two sets of berthing device

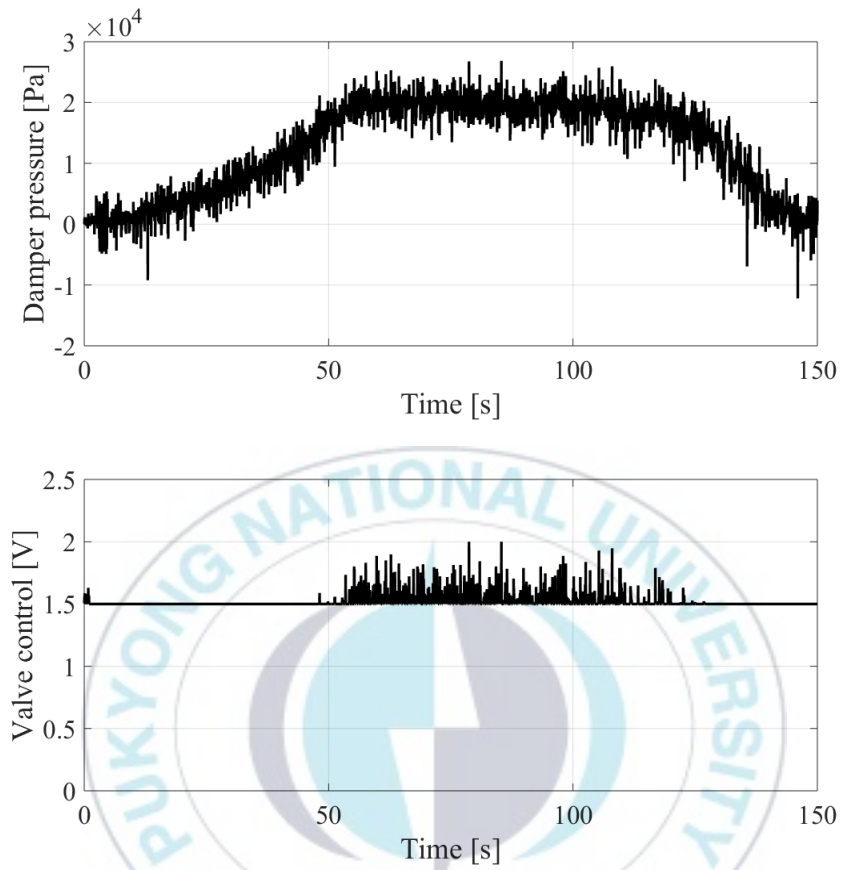


Fig. 4-11 Bow side damper pressure(above) and damper valve control(below)

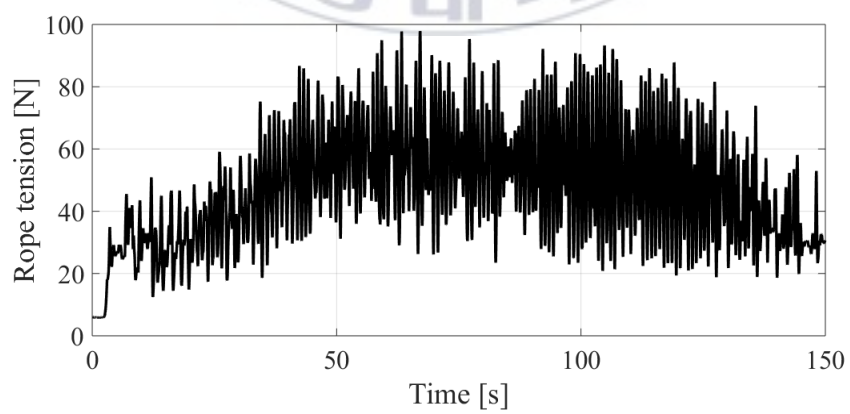


Fig. 4-12 Bow side winch rope tension

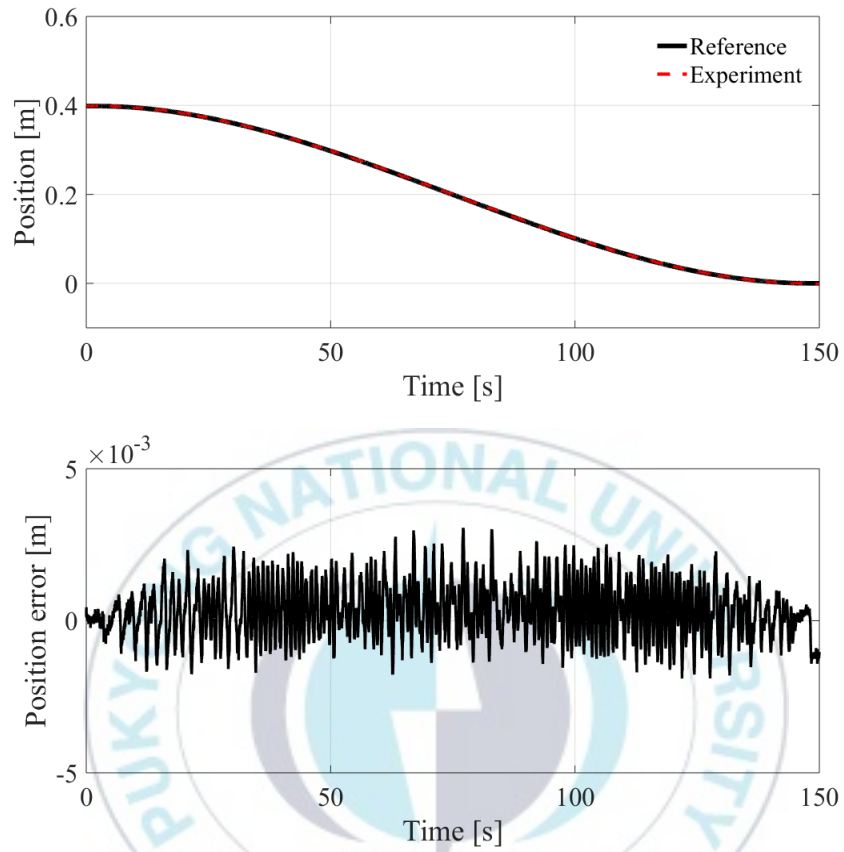


Fig. 4-13 Bow side position(above) and position error(below)

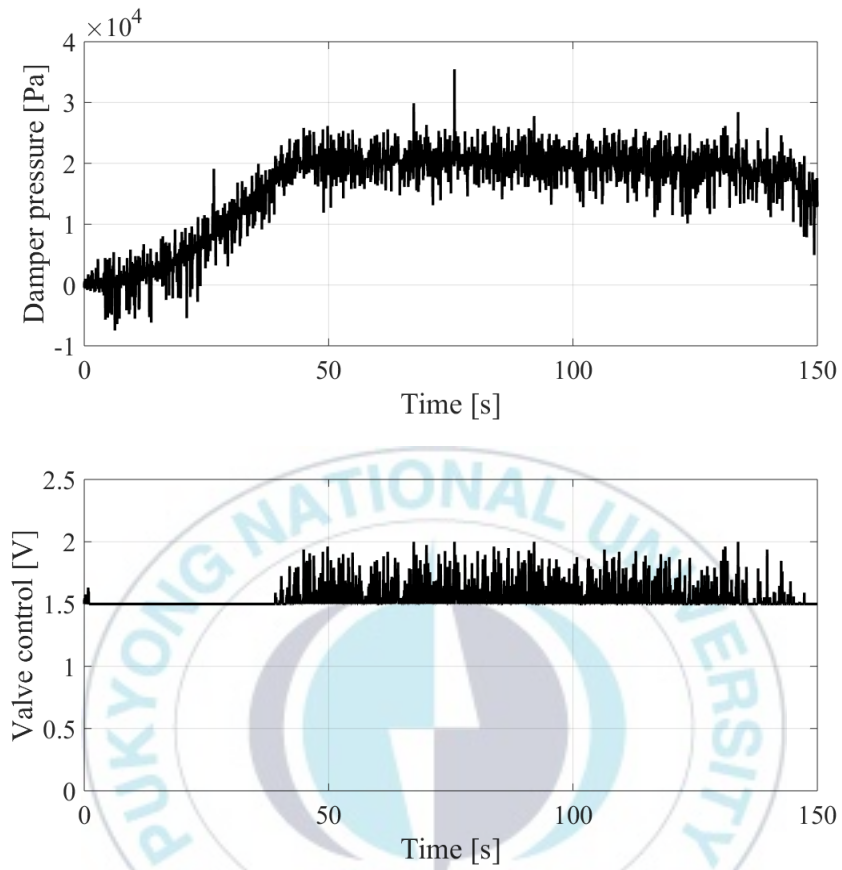


Fig. 4-14 Stern side damper pressure(above) and damper valve control(below)

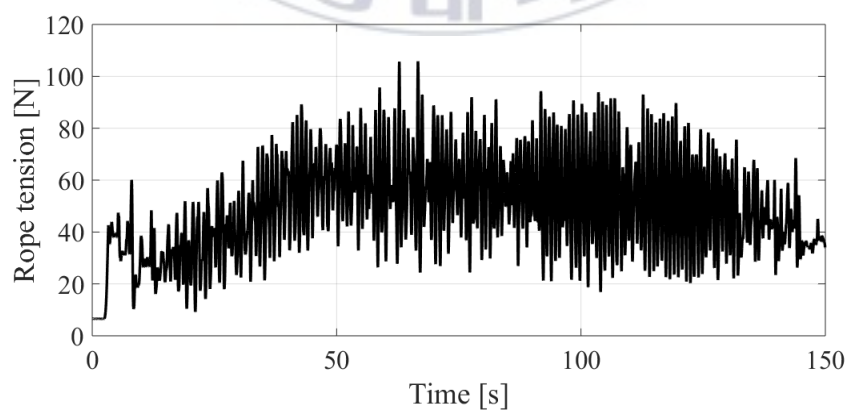


Fig. 4-15 Stern side winch rope tension

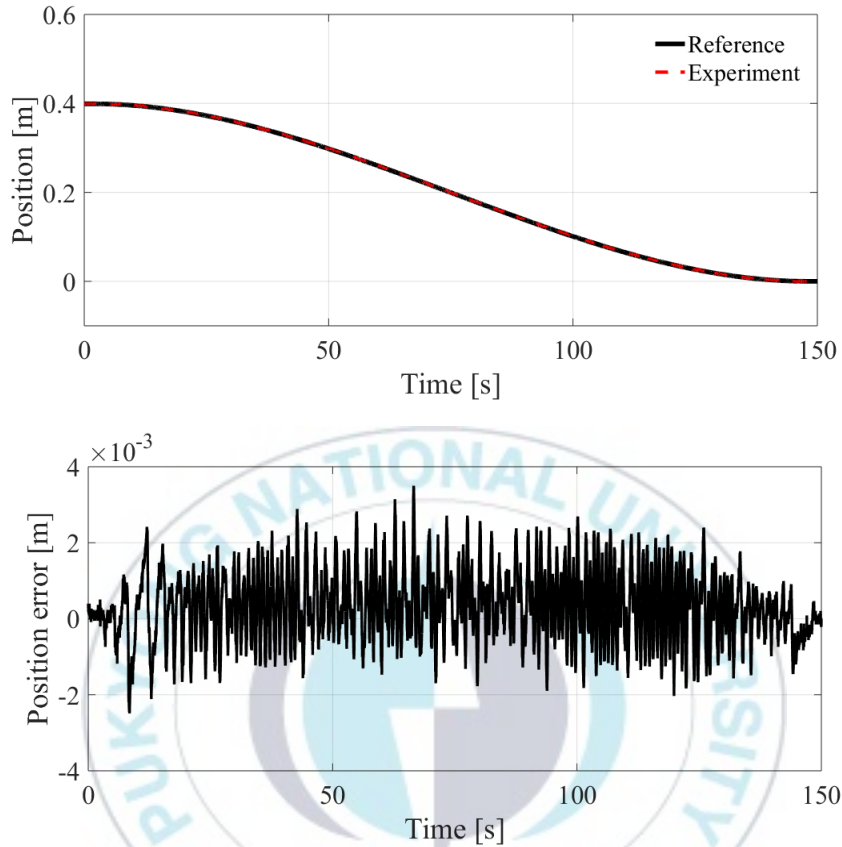


Fig. 4-16 Stern side vessel position(above) and position Error(below)

Fig. 4-11~13은 선수 측에서의 결과 값이다. 앞선 실험 결과와 마찬가지로 댐퍼압력은 20[kPa]을 넘지 않도록 제어되고, 윈치 로우프의 장력은 60[N]을 넘지 않도록 접안이 이루어진 것을 확인할 수 있다. Fig. 4-14~16은 선미 측에서의 결과값이다.

안벽과 평행한 상태에서는 선수와 선미 모두 유사한 결과 값을 얻었다. 또한, 설정된 시간에 도달하였을 때 선수와 선미부분과 안벽과의 거리가 동시에 '0'이 되는 것을 확인하였다. 즉, 제안된 접안시스템으로의 접안 과정에서 선박과 안벽은 평행을 이룬 상태로 선박이 횡방향으로 접안기준경로를 추종하는 것을 확인하였다.

4.2.3 2조의 댐퍼와 윈치 협조 제어 실험 및 고찰(임의의 각도)

선박이 안벽과 임의의 각도로 떨어진 상태에서 실험을 진행하였다. 접안실험 전, 선박은 안벽으로부터 선수 측 0.58[m], 선미 측 0.31[m] 떨어진 위치에서 접안을 시작하였다.

아래 그래프에서 확인 할 수 있듯이 접안 과정 중 각각의 댐퍼 압력은 20[kPa]을 넘지 않도록 제어되고, 윈치 로우프의 장력은 60[N]을 넘지 않도록 접안이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

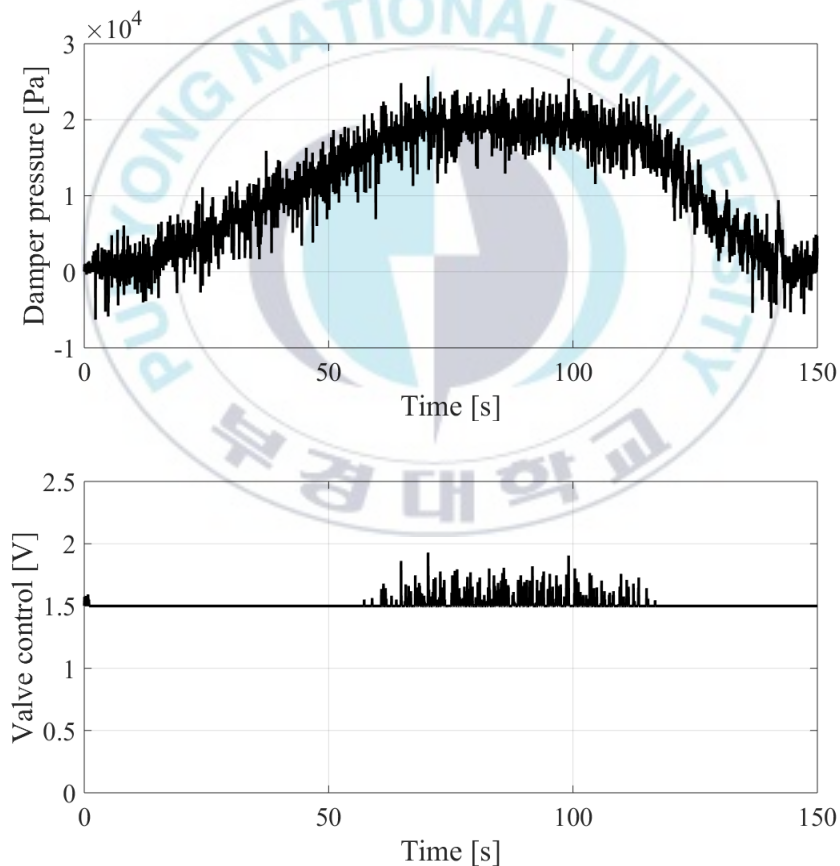


Fig. 4-17 Bow side damper pressure(above) and damper valve control(below)

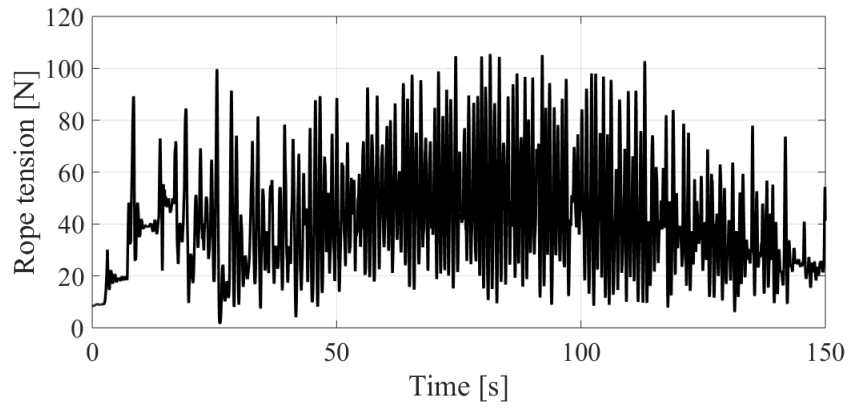


Fig. 4-18 Bow side winch rope tension

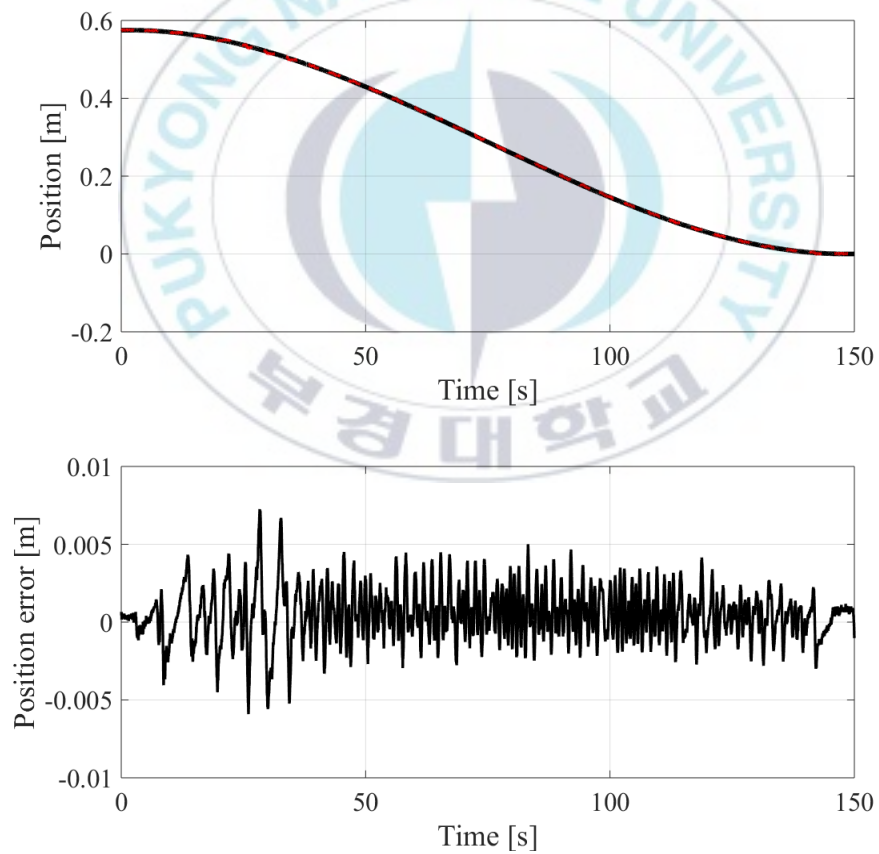


Fig. 4-19 Bow side vessel position(above) and position error(below)

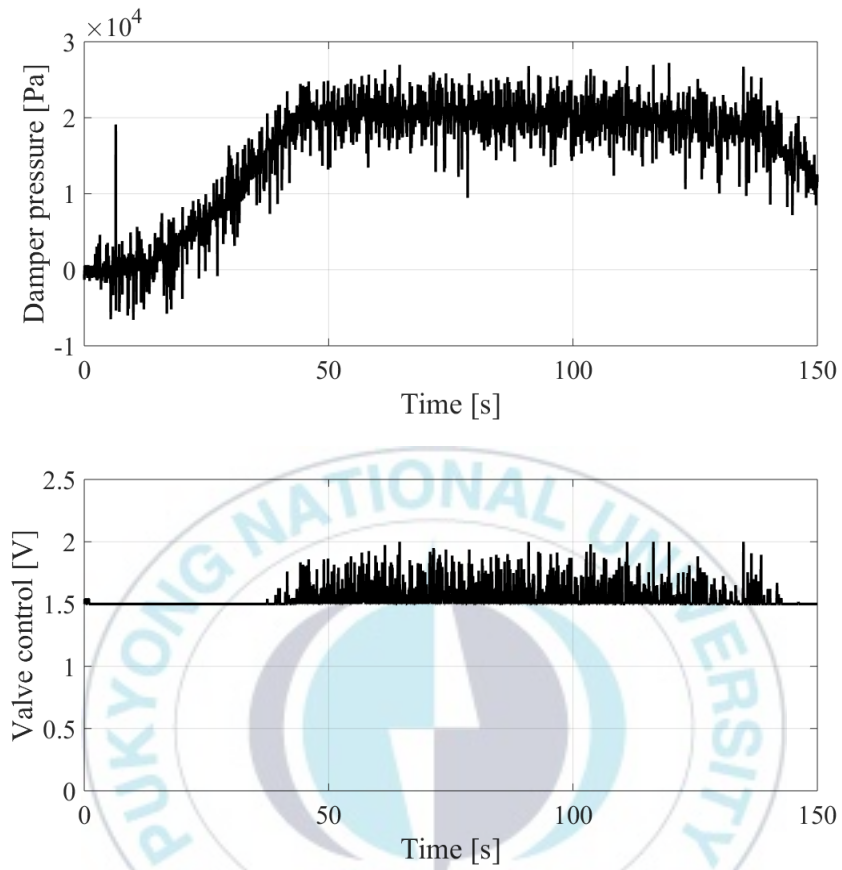


Fig. 4-20 Stern side damper pressure(above) and damper valve control(below)

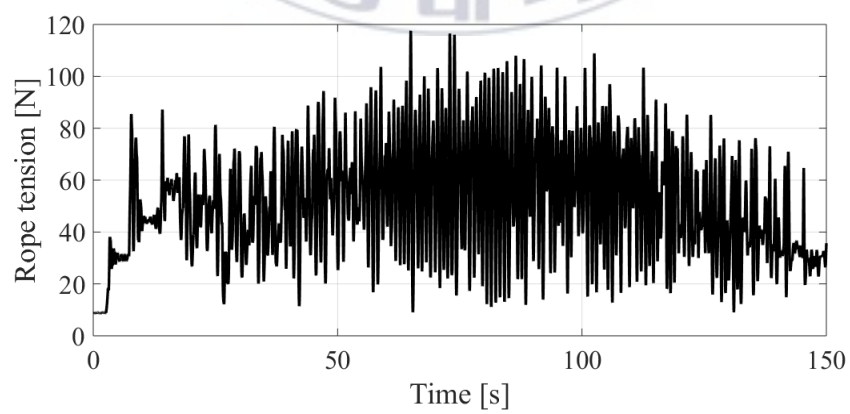


Fig. 4-21 Stern side winch rope tension

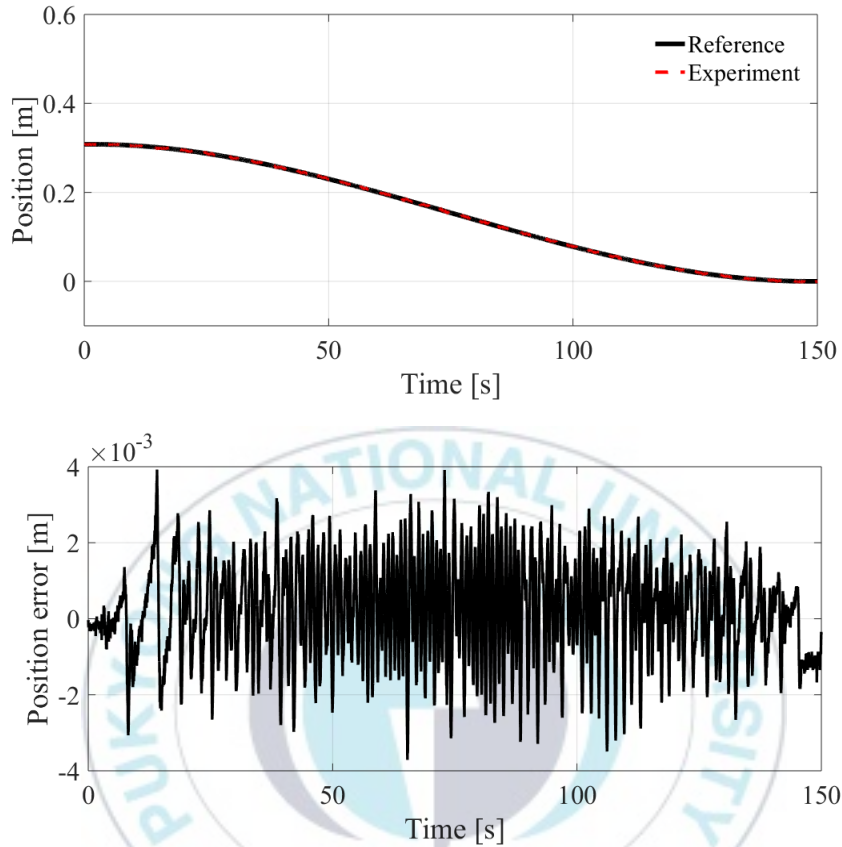


Fig. 4-22 Stern side vessel position(above) and position error(below)

앞선 두 방법의 실험을 바탕으로 진행한 마지막 실험 결과, 제안된 댐퍼와 원치의 협조제어시스템으로 구축된 접안 시스템이 제어 가능한 위치에서 접안기준 경로를 오차범위 4[mm]내로 추종하면서 접안을 완성하는 것을 실험으로 검증하였다. 또한, 안벽과 선박의 거리가 '0'이 되어 접안이 완료 하는 시점이 선수와 선미 모두 동일하게 종료되는 것을 확인하였다. 즉, 댐퍼와 원치로 구성된 협조제어 시스템으로 선박의 자동 접안이 가능함을 실험적인 결과로 확인할 수 있으며 그 유효성이 검증되었다고 판단한다.

4.3 향후 연구 계획

본 연구에서는 댐퍼와 원치로 구성된 협조제어로 선박을 접안 시키는 방법에 대해 고찰하였다. 사용된 댐퍼와 원치는 단방향으로 제어되도록 사용하였다. 특히, 댐퍼는 단순히 내부에 걸리는 압력만을 제어하는 방식으로 단순화하여 실험의 편의성과 기기의 단순화를 지향하였다. 그러나, 이는 다른 관점으로 댐퍼제어를 판단할 때, 선박의 다양한 외란에 능동적으로 대응하여 선박의 움직임을 제어하는 데는 한계를 가지고 있다. 따라서, 향후 진행되는 연구에서는 댐퍼의 양방향 제어 문제를 고려해야 할 것이다.



제 5 장 결 론

본 연구에서는 댐퍼와 윈치로 구성된 협조제어로 자동선박접안시스템을 구축하는 방안에 대해 고찰하였다. 제안된 시스템에서 사용된 윈치는 선박을 안벽으로 당기는 역할을 하며 이는 레이저 센서로 계측된 선박의 위치를 입력 신호로 접안에 적합한 속도로 윈치의 드럼을 모터로 제어한다. 이때 댐퍼는 선박이 설정된 접안기준경로를 추종할 수 있도록 윈치에 의해 당겨지는 힘의 반대 방향으로 밀어주는 역할을 한다. 댐퍼의 경우, 접안시스템의 전 과정에서 선체와 접촉하여 선체가 안전하게 접안되는 것을 돕는 역할을 한다.

접안하는 선박의 이동을 계측하여 모델링하는 이론적인 방법을 바탕으로 본 연구에서는 제안된 시스템에 대한 댐퍼와 윈치로 구축된 선박의 접안 시스템에 대한 전체 모형을 제작하였다. 이를 바탕으로 실험을 통해 제안된 시스템의 댐퍼와 윈치의 설정 값을 찾아 각각에 적용시켰다.

본 연구는 댐퍼와 윈치를 통한 선박의 접안 시스템을 제안하고 수조 실험을 통해 유효성을 평가하는데 중점을 두고 있다. 선박이 안벽에 접안할 때에는 선박의 선수, 선미의 방향과 안벽이 평행하게 된다. 또한, 설정한 시간동안 일정한 속도로 선박이 안벽으로 접근하고, 안벽에 가까워질수록 선박의 이동 속도는 “0” 가깝도록 설정한 접안기준경로를 추종되어야만 한다. 이를 위해 제안된 접안 시스템은 선박의 선수와 선미에 해당하는 안벽에 한조씩 설치되었으며, 선박이 안벽과 평행하지 않는 상태에서도 접안이 완료 될 수 있도록 제어됨을 확인하였다.

결과적으로, 댐퍼와 윈치의 협조제어시스템을 통한 접안 시스템은 그 유효성이 실험적으로 검증되었다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 허정규, 양경욱, “유압 윈치를 이용한 선박 자동 계선법” 유공압건설기계학회지, 제10권, 제4호, pp. 14-21, 2013
- [2] 안민트란, 지상원, 김영복, “터그보트와 댐퍼 협조제어를 통한 선박접안시스템 설계에 관한 연구”, 유공압건설기계학회지, 제11권, 제3호, pp. 7-13, 2014
- [3] 김영복, 최용운, 채규훈, “선박 자동접안시스템 구축을 위한 기초연구”, 한국동력기계공학회지, 제10권, 제4호, pp. 139-146, 2006
- [4] 박종용, 김낙완, “선박 자동접안을 위한 순수 횡 이동 모델링 및 제어기 설계”, 한국해양공학학회지, 제27권, 제6호, pp. 56-64, 2013
- [5] 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
- [6] K. Hasegawa and K. Kitera, “Automatic Berthing Control System Using Neural Network and Knowledge-base”, Journal of Kansai Society of Naval Architects of Japan, vol. 220, pp. 135-143. 1993
- [7] 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
- [8] 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
- [9] K. Hasegawa and K. Kitera, “Automatic Berthing Control System Using Network and Knowledge-base”, Journal of Kansai Society of Naval

Architects Japan, vol. 220, pp. 135-143 1993

[10] 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

[11] Thor I. Fossen, “Marine Control Systems”, Marine Cybernetics, 2002

[12] 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



[별첨1] Nomenclature

Nomenclature	
O_n, X_n, Y_n, Z_n	지구고정좌표계
O_b, X_b, Y_b, Z_b	선체고정좌표계
η	위치와 오일러 각 벡터
ν	선속도와 각속도 벡터
ψ	z_b 축의 오일러 각
M	선박 관성 행렬
D	점성 행렬
R	좌표 변환행렬
τ	제어입력 벡터
T	선박과 액추에이터 구성행렬
f	액추에이터 제어력 벡터
A	시스템 상태 행렬
B	시스템 입력 행렬
C	시스템 출력 행렬
k	상태피드백 시스템 게인

[별첨2] 주요 실험장치 구성품

Table 1. Specification of DC motor

DC motor (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[mNm/A]	
Speed constant	317[rpm/A]	
Speed/torque gradient	3.14[rpm/mNm]	

Table 2. 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 ($R_i=38.5[k\Omega]$)
Speed	full speed (12[Mbit/s])

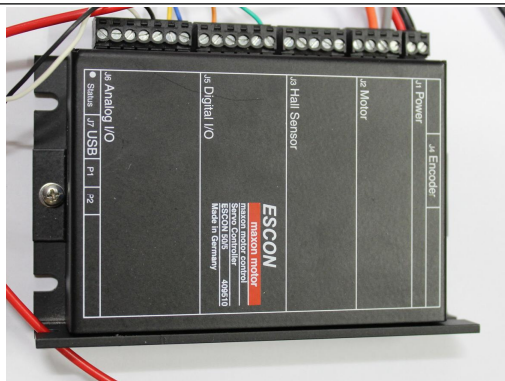


Table 3. Specification of pressure sensor

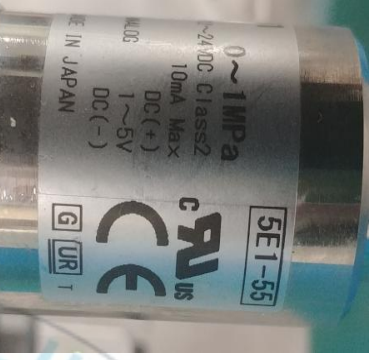
Pressure sensor (PSE-560)		
Rated pressure range	0 to 1 MPa	
Repeatability	±0.2 %(F.S.)	
Supply voltage	12 to 24 VDC	
Analog output	1 to 5 V 10 mA max	
Output impedance	Approx. 1kΩ	
Proof pressure	1.5 MPa	

Table 4. Specification of Laser distance sensor

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

감사의 글

학부 생활을 마치고 승선생활로 취업을 시작한지 오랜 시간이 지난 후, 시작한 학업이었습니다. 2년이라는 길지 않은 시간동안 많은 도움과 지원이 있었습니다. 부족한 저에게 아낌없는 격려를 보내주신 많은 분들께 감사의 인사를 올립니다.

우선 학부시절 그리 뛰어난 학생이 아님에도 불구하고 뒤늦은 대학원 진학에 관심을 가져 주시고, 더불어 아낌없는 가르침을 주신 김영복 교수님의 지도 아래 본 논문을 마무리 할 수 있었습니다. 앞으로 공부해야 할 것이 더 많아지는 마무리가 되었습니다. 교수님께서 몸소 보여주신 열정과 제자들에 대한 애정에 깊은 존경과 감사를 드립니다. 부족한 표현으로 그 감사 인사를 다 올리진 못하지만, 저 또한 근무하는 본교 실습선에서 후배를 위한 교수님의 열정을 본받는 것으로 그 인사를 꾸준히 하려합니다.

그리고 좋은 지도와 강의로 지금의 제 자리를 만들어주신 학과 교수님과 부족한 제 논문발표에 소중한 시간 내어주신 모든 교수님께 감사의 인사를 올립니다. 특히, 학부시절 승선지도부터 진로 상담, 전공 강의로 해기사로의 자질을 길러주신 고대권 교수님께도 감사드립니다. 부족한 논문이지만 지도와 격려로 심사를 맡아주신 정석호 교수님, Anh Minh Tran Duc 박사님께도 감사드립니다.

그리고 우리 해양제어시스템 실험실 식구들이 아니었다면 이 논문을 쓰기 어려웠을 것이라 생각합니다. 같이 공부하면서 응원과 도움을 주었던 후배 은호와 태완이, 동훈이, 타지에서 생활하면서도 웃음을 잃지 않고 학업에 열중한 모습으로 응원해준 Le Nhat Binh, Tran Manh Son, Nguyen Van Trong 감사합니다. (Thanks for your hospitality) 대구에서 일하면서도 주말에 부산까지 와서 실험실 석사 선배로써 조언과 격려를 아끼지 않았던 친구 상진에게도 감사의 인사를 전합니다. 그리고 실험실에 찾아와 응원을 아끼지 않았던 경주, 민종이를 비롯한 학과 후배들에게도 감사의 마음을 전합니다.

학업과 근무를 병행할 수 있도록 많은 도움주신 박환철 일기사님의 격려로 수업에도 집중할 수 있었습니다. 매번 저의 편의로 바뀌는 당직에도 싫은 소리 한번 안하고 도와준 일호 형님, 상찬 형님, 재성이, 가야호 식구들께도 감사의 인사를 올립니다.

마지막으로 항상 무엇이든 제가 할 수 있다는 마음을 가질 수 있도록 믿어주시고 응원해주시는 아버지, 감사하고 사랑합니다. 저도 아버지의 자랑이 될 수 있도록 더 성장하겠습니다.

2018년 2월

김창우

