

工學博士 學位論文

선박의 자동 항행을 위한
최적 항로 결정과 LOS 가이드 시스템

An Optimal Route Decision and LOS Guidance System
for Automatic Navigation of Ships

指導教授 金 鍾 和

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科

李 丙 結

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	vii
List of Figures	xi
List of Tables	xiv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 관련 연구	3
1.3 연구 내용	6
제 2 장 선박의 수학 모델	8
2.1 좌표계와 변수	8
2.2 선박의 수학모델 표현 방법	9
2.3 6차원 비선형 선박모델	11
2.4 3차원 비선형 선박모델	21
2.5 선형 조종운동모델	23

제 3 장 항로 결정 알고리즘	28
3.1 전자해도	28
3.2 모폴로지 기법을 이용한 항로 결정 알고리즘	32
3.3 유전 알고리즘을 이용한 항로의 최적화	47
제 4 장 LOS 가이드선 시스템	59
4.1 LOS 가이드선 시스템	59
4.2 LOS 가이드선 규칙	60
4.3 직선항로 LOS 가이드선 시스템의 최적화	71
4.5 항로 추종 시뮬레이션	80
제 5 장 시뮬레이션 및 고찰	83
5.1 오토파일럿 시스템	83
5.2 시뮬레이션	94
제 6 장 결 론	123
참 고 문 헌	125

An Optimal Route Decision and LOS Guidance system for Automatic Navigation of Ships

Byungkyul Lee

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

ABSTRACT

Recently, satellite navigation systems with low cost are supplied as the result of technological development related to computer and communication. With the aid of such a navigation system and sensors necessary to navigation, a lot of information about ship navigation can be on-line collected and real-time processed on an electronic navigational chart. While, as a large scale of ships are constructed and the total number of operators is decreased in economical aspect, ship navigation circumstance demands more severe requirements in navigation system such as accurate path tracking and collision avoidance. To supplement requirements related to automatic ship navigation, a guidance and control system with a new concept must be composed.

This thesis deals with three main algorithms required to comprise an automatic guidance and control system for general ships equipped with a main propeller as an actuator and a rudder as a yaw angle controller. One of them is an algorithm to generate optimal way points

and/or an optimal route based on the ECDIS equipped with the electronic navigational chart. The second algorithm is to automatically generate line-of-sight guidance law for a ship to follow the navigational route composed of way points. The last algorithm is an autopilot control algorithm to accurately track the yaw angle command generated from the guidance system.

At first, this thesis suggests an optimal route decision algorithm based on the electronic navigational chart. The algorithm comprises two steps which are to generate a variety of routes and to search an optimal route to satisfy navigational constraints. In the first step, in order to generate a variety of routes, the closing and thinning technique to deal with the image information of the electronic navigational chart are adopted. The closing technique makes rough coastal line smooth, the thinning technique offers outline of cruisable area and then a variety of routes are decided based on way points. In the second step, a dividing technique of adjacent convex polygons is discussed in order to transform an optimal route decision problem into boadline decision problem. And then, a real-coded genetic algorithm is applied to decide an optimal route or optimal way points by trading off between navigational distance and propulsive energy loss. Through a lot of simulation examples the effectiveness of the suggested algorithm is assured.

At second, a method to comprise a guidance system is suggested. To do this, a guidance law for straight-line routes is derived as a function of advanced ship speed and perpendicular position error. And

also, a guidance law for generating turning routes between straight-line routes is derived as a function of yawing angular velocity. Therefore, it is possible to comprise a guidance system for an optimal route composed of straight-line routes and turning routes for automatic ship navigation. The parameters of the suggested guidance system are regulated by the genetic algorithm. While they are optimized under a position tracking error constraint in the coastal navigation where exist unknown currents, they are optimized under a propulsive energy loss constraint in the oceanic navigation. Many simulations for a linear ship model assures the effectiveness of the suggested guidance system relative to the conventional guidance system.

At last, a comprising method of autopilot system is discussed in order to compensate the tracking error for the yaw angle command. Most of the control algorithms for the conventional autopilot systems are the types of proportional derivative control because they do not possess nonlinearity compensation ability for the real nonlinear ships. In this thesis, a fuzzy PID control algorithm is discussed which can compensate ship nonlinear dynamics and eliminate the steady state error of the yaw angle. A lot of simulations for nonlinear ship models are executed in connection with the suggested guidance system using various navigational routes. In the conclusion, the suggested algorithms in this thesis are turned to be effective through various route tracking simulation studies.

Nomenclature

A	projected cross-sectional area
A_{wp}	water plane area
\overline{BG}	distance between the center of gravity CG and the center of buoyancy CB
CG	center of gravity
CB	center of buoyancy
$\mathcal{C}(\mathbf{v})$	matrix of Coriolis and centripetal terms
$\mathcal{C}_A(\mathbf{v})$	hydrodynamic Coriolis and centripetal matrix
$C_D(R_n)$	drag-coefficient based on the representative area
\mathcal{C}_{RB}	rigid-body Coriolis and centripetal matrix
D	linear damping matrix
$\mathcal{D}(\mathbf{v})$	damping matrix
$D_n(\mathbf{v})$	non-linear damping matrix
$D_p(\mathbf{v})$	radiation-induced potential damping due to forced body oscillations
$D_s(\mathbf{v})$	linear skin friction due to laminar boundary layers and quadratic skin friction due to turbulent boundary layers
$D_w(\mathbf{v})$	wave drift damping
$D_M(\mathbf{v})$	damping due to vortex shedding (Morison's equation)
$\mathcal{A}(U)$	viscous damping force due to vortex shedding
f_o	external forces

$\mathbf{g}(\mathbf{n})$	vector of gravitational forces and moments
\mathbf{g}_0	vector used in trim for ballast control
\overline{GM}_T	transverse metacentric height
\overline{GM}_L	longitudinal metacentric height
I_x	moments of inertia about the x_b
I_y	moments of inertia about the y_b
I_z	moments of inertia about the z_b
J	object function
K	moment about the x -axis
K_T	turning coefficient
K_1	gain for perpendicular error
K_2	gain for forward speed
L	length of hull
M	moment about the y -axis
\mathbf{M}	inertia matrix (including added mass)
\mathbf{m}_o	moment of external forces about O
\mathbf{M}_A	added inertia matrix
\mathbf{M}_{RB}	rigid-body inertia matrix
N	moment about the y -axis
$\mathcal{N}(P_1)$	the number of nonzero neighbor pixel for P_1
p	angular velocity about the x -axis
P_e	perpendicular position error
P_d	desired position
q	angular velocity about the y -axis
r	angular velocity about the z -axis

r_G	center of gravity
R	ship's turning radius
R_n	Reynolds number
$S(P_1)$	the number of transition of $P_2, P_3, \dots, P_8, P_9$
T_E	time delay of rudder
u	linear velocity about the x -axis
U	velocity of the vehicle
v	linear velocity about the y -axis
V_c	mean current velocity
w	linear velocity about the z -axis
w	disturbance vector
x_b, y_b, z_b	body fixed coordinate
x_b	longitudinal axis (directed from aft to fore)
x	position about the x -axis
X	force in the x -direction
y_b	transverse axis (directed to starboard)
y	position about the y -axis
Y	force in the y -direction
Y_u	partial derivative of Y with respect to u
z_b	normal axis (directed from top to bottom)
z	position about the z -axis
Z	force in the z -direction
β	current direction
δ	rudder angle
δ_c	control rudder angle

$ \delta_{max} $	max angular velocity of rudder
\mathbf{n}	position and Euler angle
Θ	Euler angle about the y -axis
\mathbf{v}	body-fixed linear and angular velocity vector
\mathbf{v}_1	linear velocity of $x_{bV} \ bz_b$
\mathbf{v}_2	angular velocity of $x_{bV} \ bz_b$
ρ	fluid density
$\boldsymbol{\tau}$	vector of control inputs
τ_1	forward control force
$\boldsymbol{\tau}_H$	hydrodynamic forces and moments with respect to hull
$\boldsymbol{\tau}_{HD}$	hydrodynamic forces and moments
$\boldsymbol{\tau}_P$	hydrodynamic forces and moments with respect to propeller
$\boldsymbol{\tau}_R$	hydrodynamic forces and moments with respect to rudder
$\boldsymbol{\tau}_{RJ}$	radiation-induced forces and moments
$\boldsymbol{\tau}_{RB}$	generalized vector of external forces and moments
ϕ	Euler angle about the x -axis
ψ	Euler angle about the z -axis
Ψ_d	desired yaw angle
Ψ_{LP_e}	yaw angle of LOS vector
$\Psi_{w\beta 2}$	yaw angle from WP1 to WP2
$\Psi_{w\beta 23}$	turning angle among WP1, WP2 and WP3
∇	displaced volume of water

List of Figures

- Fig. 2.1 Motion variables for marine vessel
- Fig. 2.2 Transverse metacentric stability
- Fig. 3.1 Example of ECDIS
- Fig. 3.2 The procedure of a route decision algorithm
- Fig. 3.3 An original image and a binary image
- Fig. 3.4 An example of a binary coded data
- Fig. 3.5 Dilation mask
- Fig. 3.6 An example of dilation
- Fig. 3.7 An original image and a resultant dilation image
- Fig. 3.8 Erosion mask
- Fig. 3.9 An example of erosion
- Fig. 3.10 An original image and a resultant erosion image
- Fig. 3.11 Closing mask
- Fig. 3.12 A resultant closing image
- Fig. 3.13 Pixel array used for thinning algorithm
- Fig. 3.14 Arrays of structural elements
- Fig. 3.15 Resultant thinning images
- Fig. 3.16 Route decision algorithm
- Fig. 3.17 A result of route decision simulation(safe water depth : 5 [m])
- Fig. 3.18 A result of route decision simulation(safe water depth : 10 [m])
- Fig. 3.19 An example of route decision
- Fig. 3.20 An example of border lines
- Fig. 3.21 Operation of a genetic algorithm

Fig. 3.22 An objective function value and parameters

Fig. 3.23 Initial routes

Fig. 3.24 An optimal route (safe water depth : 5 [m])

Fig. 3.25 An optimal route (safe water depth : 10 [m])

Fig. 4.1 A block diagram of an INS system

Fig. 4.2 Definition of a LOS vector for a straight line

Fig. 4.3 LOS guidance for a straight line

Fig. 4.4. Definition of turning variables

Fig. 4.5 Turning circle for a constant rudder angle

Fig. 4.6 An LOS vector for turning circle

Fig. 4.7 The coordinate systems and motion variables for a marine vessel

Fig. 4.8 Definition of average velocity V_c and direction β of the current
for a surface vessel

Fig. 4.9 Simulations of LOS guidance system in the near sea

Fig. 4.10 Simulations of LOS guidance system in the deep sea

Fig. 4.11 Simulation result for path following

Fig. 5.1 The block diagram of an autopilot system

Fig. 5.2 Structure of a nonlinear fuzzy PID auto-pilot

Fig. 5.3 Membership functions for input variables

Fig. 5.4 Membership functions for output variables

Fig. 5.5 Partition of input combinations

Fig. 5.6 Gain scheduling of fuzzy PID controller

Fig. 5.7 Course-changing simulation

Fig. 5.8 30°course-changing simulation

Fig. 5.9 45°course-changing simulation

Fig. 5.10 60°course-changing simulation

- Fig. 5.11 90°course-changing simulation
- Fig. 5.12 Simulation result for path following (PD controller)
- Fig. 5.13 Simulation result for path following (fuzzy PID controller)
- Fig. 5.14 Course-changing simulation
- Fig. 5.15 30°course-changing simulation
- Fig. 5.16 45°course-changing simulation
- Fig. 5.17 60°course-changing simulation
- Fig. 5.18 90°course-changing simulation
- Fig. 5.19 Simulation result for path following (PD controller)
- Fig. 5.20 Simulation result for path following (fuzzy PID controller)
- Fig. 5.21 Course-changing simulation
- Fig. 5.22 30°course-changing simulation
- Fig. 5.23 45°course-changing simulation
- Fig. 5.24 60°course-changing simulation
- Fig. 5.25 90°course-changing simulation
- Fig. 5.26 Shallow water effect simulation (depth : 40m)
- Fig. 5.27 Shallow water effect simulation (depth : 30m)
- Fig. 5.28 Shallow water effect simulation (depth : 25m)
- Fig. 5.29 Shallow water effect simulation (depth : 20m)
- Fig. 5.30 Simulation result for path following at shallow water
(PD controller)
- Fig. 5.30 Simulation result for path following at shallow water
(fuzzy PID controller)
- Fig. 5.31 Simulation result for path following of an oil tanker in case
of depth-variation

List of Tables

- Table 2.1 The notation of SNAME for marine vessel
- Table 2.2 The parameters of Nomoto's models for cargo ship and oil tanker
- Table 3.1 The structure of S-57 edition 3
- Table 3.2 Types and meaning of the feature object
- Table 4.1 The Specification of a cargo ship(mariner class)
- Table 5.1 The incremental output for scaled inputs outside interval $[-L, L]$
- Table 5.2 Fuzzy spaces generated by fuzzifier
- Table 5.3 The specifications of Mariner Class Vessel
- Table 5.4 Non-dimensional hydrodynamic coefficients for the Mariner Class Vessel
- Table 5.5 The specifications of the ESSO 190,000 dwt tanker
- Table 5.6 Non-dimensional hydrodynamic coefficients for the ESSO 190,000 dwt Tanker (Bis-system)

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

선박 운항의 주요한 목적은 항해 중 발생할 수 있는 좌초, 침몰, 충돌로부터 선박의 안전성을 확보하는 문제와 정해진 항로를 정확하게 추종하는 문제로 요약할 수 있다. 정확한 항로 추종은 운항 중 추진에너지의 손실을 최소화하고 최단시간에 목적지에 도달하는 것을 목표로 한다. 선박 자동화의 목적 또한 선박 운항의 목적과 동일한 선박의 안전성을 확보하고 선박의 운항 경제성을 향상시키는 것이 된다. 이를 위하여 Sperry와 Minosky의 자동조타 시스템에서 시작된 선박 자동화에 대한 연구는 전기, 전자 기술의 발달에 따라 다양한 방향으로 진행되고 있다^[1,2,3].

자동화의 목적을 달성하기 위해서는 최적화된 항로를 결정할 수 있는 항로 결정 알고리즘과 결정된 항로를 선박이 정확하게 추종할 수 있도록 유도하는 가이드نس 시스템, 그리고 가이드نس 시스템의 유도 명령에 따라 선박을 신속하고 정확하게 제어하는 오토파일럿 시스템이 필요하다^[4~6]. 지금까지 항로를 결정하고 선박이 항로를 추종하도록 유도하는 작업은 항해사들의 경험과 지식을 통하여 이루어져 왔고, 선박을 제어하는 오토파일럿 시스템은 PD형 제어기가 사용되어 왔다.

대부분의 선박에 GPS장치가 장착되고, 전자해도에 기반한 INS와 ECDIS가 선박에 탑재됨에 따라 선박 운항에 있어 다양한 정보를 한 눈에 볼 수 있게 되었고^[7~10], 항로 결정에 있어 기존의 종이 해도 상에서 항로를 결정하던 방법에서 벗어나 전자해도 상에서 항로를 결정할 수 있게 되었다. 실제의 경우 전자해도 상에서 항로를 결정하는 문제는 수많은 고려 사항과 넓은 탐색 공간 등의 문제로 연구 진척이 느리고 활발한 연구가 진행되지 못하고 있다. 전자해도 상에서 항로를 결정하는 연구는 충돌회피 시스템^[11~14]이나 항로 추종 시스템^[15~18]의 기초 연구로서 중요한 하나의 연구 분야이

다. 국내외적으로 연구가 부족하여 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

선박이 대형화되고 통항량이 증가함에 따라 협수로 및 항구 내 선박 운항의 위험도가 증가하고, 선박이 자동화, 고속화됨에 따라 고도의 선박 조종능력이 요구되고 있다. 그러나, 직접 선박을 운항하는 항해사들의 수가 경제적인 이유로 감소하고, 해난 사고의 주요 원인으로 항해사의 근무태만, 실수 등이 대두됨에 따라 항해사를 도와 자동으로 선박 운항이 가능하도록 선박을 유도하는 가이던스 시스템의 연구와 개발이 필요하게 되었다. 또한, 다양한 종류와 목적의 특수선이 개발됨에 따라 회두각 유지 및 변침(일반적인 오토파일럿)^[19~22], 전자해도를 이용한 변침점(항로) 추종제어^[23~25], 온라인 변침점 생성 또는 항로 생성과 충돌 회피^[11~14], 자동 접·이안 시스템^[26~29], 동적 위치유지 시스템 (dynamic positioning system)^[30] 등과 같은 다양한 기능을 갖는 항법유도제어 시스템에 관한 연구가 대두됨에 따라 이와 관련된 가이던스 시스템의 연구가 필요하게 되었다. 가이던스 시스템은 크게 세 가지의 기능을 갖는다. 첫째는 항행 목적을 달성하기 위해 요구되는 선박의 속도, 회두각, 위치 등을 결정하는 것이고, 둘째는 운항의 안전성을 위해 선체를 안정화하거나 감속하는 것이고, 셋째는 선체 주위의 파도, 바람, 해류 등의 외란 입력에 대한 선박의 민감도를 감소시키는 것이다^[4].

이러한 가이던스 시스템이 선박을 정확하게 유도하기 위해서는 선박 운항 환경에 강인하고 모델의 파라미터 변화에 적응성을 갖고 있으며, 정확하고 빠른 변침 능력을 갖추고 큰 회두각 변화에 오버슈트를 발생시키지 않는 오토파일럿 시스템이 요구된다^[5,6]. 기존의 오토파일럿 시스템은 우수한 성능과 안정성이 검증되어 대부분의 선박에 적용되어 운항 중에 있다. 그러나, 선형 제어기의 한계로 비선형 보상 능력이 결여되고, 적분 동작이 포함되어 있지 않아 정상상태 오차가 존재하여 회두각 유지제어 이외의 항로 추종제어에서 한계를 갖는다. 따라서, 신속하고 정확한 제어 성능을 갖고 정상상태 오차를 갖지 않는 비선형 오토파일럿 시스템의 연구가 필요하다.

1.2 관련 연구

최근 저가의 위성항법장치가 보급되고, 센서, 통신, 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 실시간 온라인으로 전자해도 상에서 선박 운항에 관련한 다양한 정보를 취급할 수 있게 되었다. 이러한 선박 운항환경의 변화에 따라 온라인 변침점 생성을 통한 항로 결정, 변침점 추종을 통한 항로 추종 문제, 오토파일럿 시스템 등에 관한 심도있는 연구를 필요로 하고 있으며 이와 관련된 국내외의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

전자해도 상에서 선박의 항로를 결정하려는 연구는 육상에서 차량의 경로를 결정하는 연구 등에 비해 매우 부족하다^[31,32]. 국내에서는 하가 A* 알고리즘을 보완해 장애물 가중치 적용법과 부분 직선경로 연결법을 사용하여 항로를 결정하는 연구를 수행하였다^[31]. 하의 방법은 발견적 방법을 사용하여 깊은 골이 존재하는 경우, 탐색 시간이 길어지는 문제가 발생하였다. 육상의 경우, 목적지까지의 거리, 목적지로 가는 각 도로망의 현재 시간에서의 도로 혼잡 정도, 신호등의 수, 차선의 넓이, 회전 제약사항 등에 가중치를 두어 최적 주행 경로를 결정한다. 차량의 최단 경로 탐색 문제는 그래프 이론 및 인공지능의 한 분야로서 많은 연구가 이루어지고 있다^[33~36]. 개발된 탐색 알고리즘은 Dijkstra 알고리즘, Floyd 알고리즘, A* 알고리즘 등이 있다^[37]. 해상의 경우, 육상의 경우에 사용된 목적함수를 사용하는 것이 부적절하므로 해상의 경우에 적절한 목적함수를 구성하여 경로를 최적화하는 연구가 필요하다.

선박의 가이드스 시스템에 대한 연구는 미사일, 어뢰, 차량에 대한 가이드스 시스템에 관한 연구에 비해 상대적으로 관심이 적었으나, 무인 잠수정이나 방제 로봇과 같은 특수 목적의 선박들이 연구 개발되면서 선박의 가이드스 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다^[3,5,6,38,39].

Fossen은 변침점 정보를 데이터 베이스화하고 데이터 베이스의 정보를 활용하여 항로를 결정하는 변침점 가이드스 시스템(way-point guidance

system)을 제안하였다^[5,6,23]. 변침점 가이드스 시스템은 변침점 사이의 직선항로와 선회항로를 선박의 물리적 제한을 반영한 시뮬레이터를 통해 경로를 생성하도록 구성되었다^[6]. Fossen은 또한 보간법에 의해 변침점 사이의 항로를 생성하는 방법을 제안하였다^[6].

미사일의 목표물 추적시스템에서 연구되어 온 가시선(line of sight)을 이용한 LOS 가이드스^[4,40]를 선박에 적용하려는 연구들이 진행되고 있다^[38,39]. 미사일의 목표물 추적 시스템은 이동 중이거나 고정된 목표물을 추적하는 것을 목표로 하는 반면, 선박은 항로를 결정하는 변침점을 추종하는 것을 목표로 한다. 변침점 사이의 선박 운항에서 현재 선박의 위치에서 다음 변침점이나 변침점 사이 임의의 한 점으로 가시선 벡터를 결정하고 이 가시선 벡터를 회두각 제어를 위해 사용하는 가이드스시스템을 LOS 가이드스 시스템이라 한다^[5]. 선박에 장착된 GPS 시스템의 위치 정보만을 이용하여 변침점 사이의 직선항로에서 회두각 유지를 위한 오토파일럿의 기준입력을 생성함으로써 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능하다. 이러한 이유로 항로 추종제어에 있어 LOS 가이드스 시스템에 대한 관심이 커지고 있다^[5,23,39].

Brevik와 Fossen은 직선항로에서 현재 선박의 위치에서 변침점 사이의 한 점으로 가시선 벡터를 결정하고 이 벡터를 회두각제어를 위해 사용하는 LOS 가이드스 시스템을 제안하였다^[6,30]. 이 LOS 가이드스 시스템은 선회항로에 대한 가이드스 없이 목표 변침점의 일정한 영역(circle of acceptance) 안으로 선박이 진입하게 되면, 목표 변침점을 다음 변침점으로 전환하여 변침을 수행하도록 구성하였다^[29]. 이러한 구성은 원양항해와 같이 장애물이 없거나 선회를 위한 충분한 공간이 있는 경우에는 큰 문제가 없지만, 근해나 장애물이 있는 경우 정확한 선회를 위한 가이드스가 효율적으로 이루어지기 힘들고, 선회를 위해 부가적으로 더 많은 변침점을 선택해야하는 문제를 발생시킨다^[38].

선박의 회두각 유지를 위해 설계된 오토파일럿 시스템은 일반적으로

선형요소와 비선형 요소로 구성된다. 선형 요소는 PD제어에 저역 통과 필터를 추가한 형태로 표현되고, 비선형 요소는 천후조정기구(weather adjustment)라 불리며, 고주파 과도에 대해 잦은 조타를 피하기 위해 사용하는 방법으로 back lash, dead band, dual gain 등이 이용되고 있다^[41]. 선형 요소의 저역 통과 필터는 PID 제어 명령의 고주파 성분을 제거하는 역할을 하고, 비선형 요소는 고주파 과도에 대해 잦은 조타를 방지하기 위해 사용되어, 선박운동 자체의 비선형성을 보상하기 위한 제어 알고리즘의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 선박의 비선형성을 보상하기 위해 Sutton과 Roberts는 ANFIS(adaptive network based fuzzy inference system)에 기반하여 오토파일럿 시스템을 구성하였고^[19], Hearn 등은 신경망에 기반하여 오토파일럿 시스템을 구성하였다^[20]. 또한, Fossen 등은 비선형 벡터 backstepping 방법을 이용하여 선박의 오토파일럿과 항로 추종제어를 설계하여 LOS 가이드스 시스템을 적용하여 실선 테스트에서 만족할 만한 성과를 거두었다^[23]. 제안된 오토파일럿 시스템의 대부분은 Nomoto 등의 선형 모델에 대해 외란을 인가하여 시뮬레이션을 실시하여 비선형 선박에 대한 적용 문제를 남겨두었다. Fossen의 벡터 backstepping 방법은 비선형 선박모델에 대해 오토파일럿 뿐만 아니라 항로 추종제어, DP 등에 탁월한 성능을 나타내었지만, 선박의 모델을 모르는 경우에는 적용이 쉽지 않고, 선박모델이 벡터모델 표현이 아닌 SNAME 표현법에 의해 표현된 경우 적용이 어렵다는 단점을 갖는다^[38].

국내의 경우, 최적 제어와 적응제어 기법을 이용한 오토파일럿 시스템^[21], 신경망 이론에 기반한 오토파일럿 시스템^[22], TSK 퍼지 모델에 기반한 오토파일럿 시스템, 적응퍼지제어기를 이용한 오토파일럿 시스템^[24,25] 등이 연구되었다. 국내의 연구도 국외의 경우와 마찬가지로 대부분이 선형모델에 대한 시뮬레이션을 실시하여 비선형 선박에 대한 적용 문제가 남아 있다.

1.3 연구내용

본 논문은 선박의 운항환경 변화에 따라 주 프로펠러와 조타기를 갖는 일반적인 선박의 항법유도제어 시스템이 갖추어야 할 온라인 변침점 생성 또는 항로 생성을 위한 항로 결정 알고리즘과 전자해도를 이용한 변침점(항로) 추종제어를 위한 LOS가이던스 시스템을 제안하고 비선형 보상능력과 게인 스케줄링 기능을 갖는 퍼지 PID제어기에 기반한 오토과일릿 시스템을 도입하여 비선형 선박 모델에 대한 시뮬레이션을 통해 선박의 무인운항이나 자동운항 가능성을 확인한다.

첫째, 전자해도 상에서 항로를 결정하는 알고리즘을 구현하기 위해 모폴로지 기법인 세션화연산^[42]을 도입한다. 세션화 연산을 이용하여 항해 가능한 영역의 정보를 선분으로 추출하고, 추출한 세션화 정보를 이용하여 변침점 형태의 항로를 결정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 세션화 영상에 기초하여 항로를 결정함으로써 골이나 사점에 빠지지 않고 복잡한 지형에서도 강인하게 변침점 형태의 항로를 결정할 수 있게 한다. 또한 최적 항로를 결정하기 위해, 인접한 블록 다각형을 분할하는 방법을 고찰하여 항로결정 문제를 경계선분의 한 점을 결정하는 문제로 변환하고 유전 알고리즘을 이용하여 최소거리와 추진에너지 손실량을 최소화하는 변침점을 구함으로써 항로를 최적화한다.

둘째, LOS 가이던스 규칙을 직선항로에서 선박의 속도와 위치오차에 대한 함수로 유도하고, 선회항로에서 선회 각속도에 대한 함수로 유도한다. 다음, 유도한 LOS 가이던스 규칙으로부터 직선항로와 선회항로에 대한 가이던스 시스템을 구성하고 항로 추종 시뮬레이션을 실시하여 그 유효성을 확인한다. 특히, 해류와 같은 외란이 존재하는 바다를 항행하는 선박에 대하여 유전 알고리즘을 이용하여 직선 항로 LOS가이던스 시스템의 파라미터를 최적화하고, 최적화된 가이던스 시스템을 적용하여 시뮬레이션을 실시하여 연안 항해 시에 정해진 수직 오차 범위 내에서 선박이 운항

되도록 유도하고, 대양 항해시에는 추진 에너지 손실을 최소화하도록 선박을 유도함을 확인한다.

마지막으로 비선형 보상능력과 게인 스케줄링 기능을 갖는 퍼지 PID제어기에 기반한 오토파일럿 시스템을 도입하여 실제 선박과 유사한 비선형 선박 모델에 대한 항로 추종제어 시뮬레이션을 실시하여 제안한 LOS 가이드 시스템의 성능을 검증하고 선박의 자동 운항 가능성을 확인한다. 또한, PID제어기형 오토파일럿 시스템과 비교하여 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템에 대해 정상상태 오차 발생 여부와 천해역에서 수심변화에 따른 제어기의 성능을 고찰한다.

본 논문은 모두 6장으로 구성되어 있으며 각 장에서 수행한 구체적인 연구내용은 다음과 같다. 제 2장에서는 선박의 6차원 비선형 모델과 3차원 선형과 비선형 모델에 대하여 살펴본다.

제 3장에서는 전자해도에 대해 설명한 다음, 전처리 작업에 사용되는 채움 연산과 세션화 연산을 설명하고 연산의 결과 영상을 살펴본다. 또한, 세션화 영상에 기초하여 항로 결정 알고리즘을 구성하고 결정된 항로를 고찰한다. 세션화 영상을 수정하여 변침점 개념의 항로를 결정하는 알고리즘을 유도하고 유전 알고리즘을 이용하여 항로를 최적화한다.

제 4장에서는 직선항로와 선회항로에 대한 LOS벡터를 각각 정의하고 LOS 가이드 규칙을 유도한다. 유도된 LOS가이드 규칙의 파라미터를 유전 알고리즘을 이용하여 최적화하고 선박의 선형 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 유효성을 검증한다.

제 5장에서는 비선형 퍼지 PID제어기를 도입하여 오토파일럿 시스템을 구성하고, 회두각 유지 및 변침 기능 수행능력과 환경에 대한 적응성을 검토하기 위해 비선형 선박모델을 대상으로 시뮬레이션을 실시한다. 마지막으로 LOS 가이드 시스템과 퍼지 PID 오토파일럿 시스템을 이용하여 비선형 선박모델에 대해 항로 추종 시뮬레이션을 종합적으로 실시하고 그 결과를 검토한다. 제 6장에서는 본 연구의 결과를 정리한다.

제 2 장 선박의 수학 모델

이 장에서는 선박운동을 묘사하는 데 사용하는 변수를 정의하고, 선박의 6차원 비선형 모델과 3차원 비선형 및 선형 모델을 유도한다.

2.1 좌표계와 변수

선박 운동에 관련된 좌표계와 변수를 그림 2.1과 표 2.1에 각각 나타내었다^[5,6,43,44,45]. x_b, y_b, z_b 좌표계는 원점이 선박의 무게중심 G 에 고정되어 선박과 함께 움직이는 운동좌표계로 선박운동의 주요 변수를 묘사하는 데 사용된다. X, Y, Z 는 각각 x_b, y_b, z_b 방향에 대한 힘을 나타내고, K, M, N 은 x_b, y_b, z_b 축에 대한 모멘트를 나타내며, u, v, w 는 x_b, y_b, z_b 방향에 대한 선속도, p, q, r 은 x_b, y_b, z_b 축에 대한 각속도를 나타낸다. x, y, z 와 ϕ, θ, ψ 는 각각 x_b, y_b, z_b 축의 위치와 각도이다.

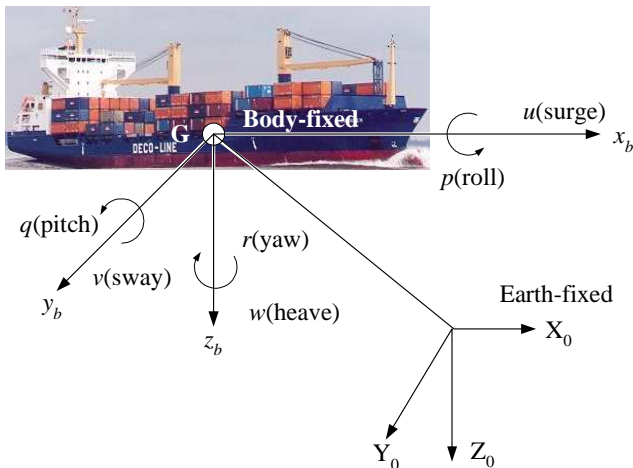


그림 2.1 선박 운동을 묘사하기 위한 변수
Fig. 2.1 Motion variables for marine vessel

표 2.1 선박 운동을 묘사하기 위해 사용하는 변수

Table 2.1 The notation of SNAME^[43] 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(heave)	Z	w	z
4	rotation about the x_b -axis(roll, heel)	K	p	ϕ
5	rotation about the y_b -axis(pitch, trim)	M	q	θ
6	rotation about the z_b -axis(yaw)	N	r	ψ

2.2 선박의 수학기모델 표현 방법

선박의 수학기모델 표현 방법은 전통적인 모델 표현 방법과 로봇 동역학에서 유도된 벡터모델 표현 방법이 있다^[6]. 선박의 운동방정식은 정역학과 동역학으로부터 유도된다. 정역학은 정박 중이거나 정속 항행하는 선체의 평형점을 묘사하는 데 사용되고, 동역학은 가속되는 선체의 운동을 묘사하는 데 사용된다. 선박의 정역학적 해석에서 중요한 이론은 아르키메데스가 발견한 유체 동역학적 부력에 관한 법칙으로 선박의 정역학적 안정도 분석의 중요한 기초가 된다. 뉴턴 역학과 오일러의 정리는 동역학적 해석의 기초가 된다^[46].

2.2.1 전통적인 모델 표현 방법(SNAME 모델)

뉴턴의 법칙과 오일러 공리에 의해 선박운동은 (2.1)과 같이 표현된다^[44].

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_H + \boldsymbol{\tau}_P + \boldsymbol{\tau}_R \quad (2.1)$$

여기서, M_{RB} 는 강체 동역학적 관성 행렬, C_{RB} 는 강체 동역학적 코리올리스 및 구심력 행렬, $\dot{\mathbf{v}} = [\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{w} \ \dot{p} \ \dot{q} \ \dot{r}]^T$ 은 선가속도 및 각가속도 벡터, $\mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ 는 선속도 및 각속도 벡터, $\boldsymbol{\tau}_H$ 은 홀의 유체동역학적 힘과 모멘트, $\boldsymbol{\tau}_P$ 은 프로펠러의 유체동역학적 힘과 모멘트, $\boldsymbol{\tau}_R$ 은 조타기의 유체동역학적 힘과 모멘트이다.

2.2.2 Fossen의 벡터모델 표현 방법

Fossen은 (2.2)와 같은 로봇 모델로부터 (2.3)과 같은 선박 운동의 벡터 모델을 유도하였다^[47]. 전통적인 모델 표현 방법은 고립된 효과를 연구할 수 있는 유체동역학적 모델에 많이 사용되고, 벡터모델은 선체 제어 시스템 설계에 대한 표준 모델로 국제협회에서 채택되어 사용되고 있다^[6].

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} \quad (2.2)$$

여기서, \mathbf{q} 는 조인트 앵글 벡터, $\boldsymbol{\tau}$ 는 토크, $M(\mathbf{q})$ 는 관성행렬, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 는 코리올리스 행렬이다.

$$M\dot{\mathbf{v}} + C(\mathbf{v})\mathbf{v} + D(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.3)$$

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

2.3 6차원 비선형 선박모델

6차원 비선형 선박모델의 벡터모델 표현은 다음과 같다.

$$M \dot{\mathbf{v}} + C(\mathbf{v}) \mathbf{v} + D(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{n}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g}_0 + \mathbf{w} \quad (2.4)$$

여기서, M 은 부가질량을 포함하는 관성행렬, $C(\mathbf{v})$ 는 부가질량을 포함하는 코리올리스 및 구심력 행렬, $D(\mathbf{v})$ 는 점성 행렬, $\mathbf{g}(\mathbf{n})$ 는 중력과 부력의 힘과 모멘트와 관련된 복원력 항, $\boldsymbol{\tau}$ 는 추력과 타력을 포함한 제어입력 벡터, \mathbf{g}_0 는 밸라스트 제어에 사용되는 벡터, \mathbf{w} 는 바람, 파도, 조류 등의 외란 벡터이다. 밸라스트 제어에 사용하는 \mathbf{g}_0 를 무시하면 (2.5)와 같은 선박 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$M \dot{\mathbf{v}} + C(\mathbf{v}) \mathbf{v} + D(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{n}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{w} \quad (2.5)$$

선박운동은 선체의 강체운동에 기인한 강체동역학적 힘과 모멘트와 유체운동에 기인한 유체동역학적 힘과 모멘트로 나누어 생각할 수 있다.

2.3.1 강체동역학적 선박 운동방정식

(1) SNAME 표현

선체의 강체동역학적 운동방정식을 기술하기 위해 SNAME 표현법에 따라 운동방정식의 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_o &= [X \ Y \ Z]^T && \text{외력} \\ \mathbf{m}_o &= [K \ M \ N]^T && \text{모멘트} \\ \mathbf{v}_1 &= [u \ v \ w]^T && \text{선속도} \\ \mathbf{v}_2 &= [p \ q \ r]^T && \text{각속도} \\ \mathbf{r}_G &= [x_G \ y_G \ z_G]^T && \text{무게중심} \end{aligned}$$

뉴턴 역학과 오일러 정리를 이용하여 선박의 6차원 강체 운동방정식을 표현하면 (2.6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
 + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

여기에서, I_x, I_y, I_z 와 $I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} = I_{zy}$ 는 (2.7)과 같이 정의되는 원점에 대한 관성행렬 I_o 의 요소이다^[5,6].

$$I_o := \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad I_o = I_o^T > 0 \tag{2.7}$$

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

(2.6)에서 처음 세 개의 방정식은 병진운동을 표현한 식이고, 아래 세 개의 식은 회전운동을 표현한 식이다.

(2) 6차원 강체 운동방정식의 벡터 표현

(2.6)을 벡터 표현으로 바꾸면 (2.8)과 같다.

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) \mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (2.8)$$

여기서,

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yz} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

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

(2.10)

이고, $\mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ 는 선속도 및 각속도 벡터, $\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ M]^T$ 는 외력 및 모멘트 벡터이다.

선박의 6차원 강체 운동방정식은 선체 고정좌표계의 원점을 적절하게 선택함으로써 간략화할 수 있다.

1) 원점을 $y_G = 0$ 선택(선박 좌우현 대칭)

일반적인 선박은 좌우현이 대칭되는 구조를 갖고 강체동역학적 선박 운

동방정식은 (2.11)과 같다^[5,6].

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) \mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (2.11)$$

여기서,

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & 0 & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_x & 0 & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & -I_y & 0 \\ 0 & -mx_G & 0 & I_{xz} & 0 & I_z \end{bmatrix}$$

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

이다.

2.3.2. 유체동역학적 힘과 모멘트를 고려한 선박의 운동방정식

Faltinsen은 유체동역학적 힘과 모멘트를 다음과 같이 표현한다^[48].

『*Forces on the body when the body is forced to oscillate with the wave excitation frequency and there are no incident waves*』

일반적으로 유체동역학에서 강체에 작용하는 유체동역학적 힘과 모멘트는 선형적으로 중첩될 수 있는 것으로 가정한다^[48]. 유체동역학적 힘과 모멘트는 유체중 선박 운동에 따른 방사유도력과 바람, 파도, 조류 등의 외

란으로 구분되고, 방사유도력과 모멘트는 다음과 같은 세 가지 요소의 합으로 표현된다^[5,6].

- 1) 선체 주변 유체의 관성에 기인한 부가질량력
- 2) 생성된 표면파에 의해 상실되는 에너지에 기인한 포텐셜 감쇠력
(조파감쇠력)
- 3) 아르키메데스의 원리에 기인한 복원력

방사유도력과 모멘트는 부가질량력과 모멘트, 포텐셜 감쇠력, 복원력에 대하여 (2.12)와 같이 표현된다.

$$\tau_{RI} = - \underbrace{M_A \dot{v}}_{\text{부가질량력}} - \underbrace{C_A(v)v}_{\text{포텐셜 감쇠}} - \underbrace{D_P(v)v}_{\text{복원력}} - g(\mathbf{n}) + g_0 \quad (2.12)$$

포텐셜 감쇠 이외에 표면 마찰, 파도 표류에 의한 감쇠, 와류에 기인한 감쇠 등을 생각할 수 있다. 이러한 감쇠력 성분을 정리하면 (2.13)과 같다.

$$D(v) := D_P(v) + D_S(v) + D_W(v) + D_M(v) \quad (2.13)$$

여기서, $D_P(v)$ 는 포텐셜 감쇠, $D_S(v)$ 는 표면 마찰에 의한 감쇠,

$D_W(v)$ 는 파도 표류에 의한 감쇠, $D_M(v)$ 은 와류에 의한 감쇠이다.

(2.13)을 (2.12)에 대입하면, 유체동역학적 힘과 모멘트는

$$\tau_{HD} = - M_A \dot{v} - C_A(v)v - D(v)v - g(\mathbf{n}) + g_0 \quad (2.14)$$

이 된다.

결과적으로, 유체동역학적 힘과 모멘트를 고려한 선박의 운동방정식은

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\mathbf{n}) = \tau_{ext} + g_0 \quad (2.15)$$

이 된다. 여기서, $M = M_{RB} + M_A$, M_A 는 유체동역학적 부가질량력과 모멘

트 행렬, $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$, $C_A(v)$ 는 유체동역학적 코리올리스와 구심력 행렬, $\tau_{ext} = \sum \tau_i$ 는 추력장치의 추력과 모멘트의 합력이다.

(1) 부가질량력과 모멘트

부가질량력과 모멘트는 선체의 가속에 비례하는 강제 조파운동에 기인하고, 인가된 힘과 180도 위상차를 갖는 압력 유도력과 모멘트이다^[5,6]. 완전히 물 속에 잠긴 수중운동체는 부가질량 계수가 일정하고 파도의 주파수에 대해서 독립적이라는 것이 가정될 수 있다. 이 가정 하에서 유체의 운동에너지는 부가질량 항을 유도하는 데 사용되어질 수 있다. 유체 운동 에너지 T_A 는 선체 고정좌표계의 속도 벡터의 제곱 형태로 표현된다^[44].

$$T_A = \frac{1}{2} v^T M_A v \quad (2.16)$$

여기서, M_A 는 6×6 부가질량항의 시스템 관성 행렬이다.

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \triangleq - \begin{bmatrix} \dot{X}_u & \dot{X}_v & \dot{X}_w & \dot{X}_p & \dot{X}_q & \dot{X}_r \\ \dot{Y}_u & \dot{Y}_v & \dot{Y}_w & \dot{Y}_p & \dot{Y}_q & \dot{Y}_r \\ \dot{Z}_u & \dot{Z}_v & \dot{Z}_w & \dot{Z}_p & \dot{Z}_q & \dot{Z}_r \\ \dot{K}_u & \dot{K}_v & \dot{K}_w & \dot{K}_p & \dot{K}_q & \dot{K}_r \\ \dot{M}_u & \dot{M}_v & \dot{M}_w & \dot{M}_p & \dot{M}_q & \dot{M}_r \\ \dot{N}_u & \dot{N}_v & \dot{N}_w & \dot{N}_p & \dot{N}_q & \dot{N}_r \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

(2.17)은 SNAME 표기법에 의해 표현된 것으로, x 방향의 가속도 \dot{u} 에 기인하는 Y 축에 대한 부가관성력을

$$Y = - Y_u \dot{u} \quad (2.18)$$

로 표현한다. 여기서, 유체력 미계수 Y_u 은 다음과 같다.

$$Y_u = - \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}} \quad (2.19)$$

유체 동역학적 코리올리스와 구심력 행렬은

$$C_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

이 되고 여기서,

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{,u}u + X_{,v}v + X_{,w}w + X_{,p}p + X_{,q}q + X_{,r}r \\ a_2 &= X_{,u}u + Y_{,v}v + Y_{,w}w + Y_{,p}p + Y_{,q}q + Y_{,r}r \\ a_3 &= X_{,w}u + Y_{,w}v + Z_{,w}w + Z_{,p}p + Z_{,q}q + Z_{,r}r \\ b_1 &= X_{,p}u + Y_{,p}v + Z_{,p}w + K_{,p}p + K_{,q}q + K_{,r}r \\ b_2 &= X_{,q}u + Y_{,q}v + Z_{,q}w + K_{,q}p + M_{,q}q + M_{,r}r \\ b_3 &= X_{,r}u + Y_{,r}v + Z_{,r}w + K_{,r}p + M_{,r}q + N_{,r}r \end{aligned} \quad (2.21)$$

이다.

유체 동역학적 관성행렬과 코리올리스 및 구심력 행렬도 선박의 대칭성을 이용하여 간략화할 수 있다.

1) 저속이고 세 평면이 대칭인 경우, 비대각 요소는 무시할 수 있고, 유체 동역학적 관성 행렬과 코리올리스 및 구심력 행렬은 각각

$$M_A = -\text{diag}[X_{,w}, Y_{,v}, Z_{,w}, K_{,p}, M_{,q}, N_{,r}], \quad (2.22)$$

$$C_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{,w}w & Y_{,v}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{,w}w & 0 & -X_{,u}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{,v}v & X_{,u}u & 0 \\ 0 & -Z_{,w}w & Y_{,v}v & 0 & -N_{,r}r & M_{,q}q \\ Z_{,w}w & 0 & -X_{,u}u & N_{,r}r & 0 & -K_{,p}p \\ -Y_{,v}v & X_{,u}u & 0 & -M_{,q}q & K_{,p}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

이 된다.

2) 선박의 xz -평면이 대칭인 경우

$$M_A = \begin{bmatrix} -X_{,u} & 0 & -X_{,w} & 0 & -X_{,q} & 0 \\ 0 & -Y_{,v} & 0 & -Y_{,p} & 0 & -Y_{,r} \\ -X_{,w} & 0 & -Z_{,w} & 0 & -Z_{,q} & 0 \\ 0 & -Y_{,p} & 0 & -K_{,p} & 0 & -K_{,r} \\ -X_{,q} & 0 & -Z_{,q} & 0 & -M_{,q} & 0 \\ 0 & -Y_{,r} & 0 & -K_{,r} & 0 & -N_{,r} \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

$$C_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

이 되고, 여기서,

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{;u}u + X_{;w}w + X_{;q}q \\ a_2 &= Y_{;v}v + Y_{;p}p + Y_{;r}r \\ a_3 &= X_{;w}u + Z_{;w}w + Z_{;q}q \\ b_1 &= Y_{;p}v + K_{;p}p + K_{;r}r \\ b_2 &= X_{;q}u + Z_{;q}w + M_{;q}q \\ b_3 &= Y_{;r}v + K_{;r}p + N_{;r}r \end{aligned} \quad (2.26)$$

이다.

(2) 유체동역학적 감쇠

유체동역학적 감쇠에는 포텐셜 감쇠, 표면 마찰에 의한 감쇠, 파도 표류에 의한 감쇠, 와류에 의한 감쇠 등이 있다.

$$D(\mathbf{v}) = D_P(\mathbf{v}) + D_S(\mathbf{v}) + D_W(\mathbf{v}) + D_M(\mathbf{v}) \quad (2.27)$$

여기서, $D_P(\mathbf{v})$ 는 포텐셜 감쇠, $D_S(\mathbf{v})$ 는 표면 마찰에 의한 감쇠, $D_W(\mathbf{v})$ 는 파도 표류에 의한 감쇠, $D_M(\mathbf{v})$ 는 와류 분계에 의한 감쇠이다.

포텐셜 감쇠는 점성 감쇠와 같은 요소에 비해 대개 무시할 수 있다. 표면 마찰은 선형 표면 마찰 성분과 비선형 표면 마찰 성분으로 나눌 수 있다. 층류 계층에 기인한 선형 표면 마찰은 저주파 운동에서 중요한 요소로 제어시스템 설계 시 그 영향을 반드시 고려해 주어야 한다. 비선형 표면 마찰은 거친 경계층에 따라 고주파 운동에서 발생한다. 파도 표류에 의한 감쇠는 파랑 중에서 항해하는 수상선박에 대한 부가저항으로 해석될 수 있다. 파도 표류에 의한 감쇠는 유효 파고의 제곱에 비례하고 높은 해

상상태(sea states)에서 전진방향 속도에 가장 영향을 미치는 감쇠이다. 횡방향과 회두각 방향은 파도 표류에 의한 감쇠보다 와류에 의한 감쇠가 크게 작용한다. 와류에 의한 점성 감쇠는 (2.28)과 같이 모델링된다.

$$\mathcal{A}(U) = -\frac{1}{2} \rho C_D(R_n) A |U| U \quad (2.28)$$

여기서, U 는 선체의 속도, A 는 수면 아래의 투사 영역, $C_D(R_n)$ 은 저항력계수, ρ 는 해수밀도, R_n 은 레이놀드 수이다. 일반적으로 선형 감쇠와 비선형 감쇠는 분리가 어려워 전체 유체동역학적 감쇠를 (2.29)와 같이 선형 감쇠와 비선형 감쇠의 합으로 표현한다.

$$\mathcal{D}(v) = \mathcal{D} + \mathcal{D}_n(v) \quad (2.29)$$

여기서, \mathcal{D} 는 선형 감쇠 행렬이고, $\mathcal{D}_n(v)$ 는 비선형 감쇠 행렬이다.

1) DP 선박에 대한 감쇠 모델

저속이고, xz 평면 대칭인 DP 선박은 전진속도 방정식(surge)과 조종 운동 방정식(sway-yaw)을 분리할 수 있고, heave, roll, pitch를 무시하면 (2.30)과 같이 선형 감쇠력과 모멘트 행렬로 표시할 수 있다.

$$\mathcal{D} = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

저속 선박의 경우, $N_v = Y_r$ 을 가정할 수 있다.

실제의 경우, 비선형 감쇠와 감쇠행렬에서 비대각 요소들을 결정하는 것이 어려우므로, 제어시스템의 목적에 따라 다양한 종류의 감쇠행렬을 사용한다.

2) 고속 선박에 대한 비선형 감쇠모델

Blanke는 비선형 커플링항을 포함하는 감쇠모델을 다음과 같이 제안했다^[49].

$$D_n(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -X_{|z|z}|z| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{|z|z}|z| - Y_{|z|z}|z| & -Y_{|z|z}|z| - Y_{|z|z}|z| \\ 0 & -N_{|z|z}|z| - N_{|z|z}|z| & -N_{|z|z}|z| - N_{|z|z}|z| \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

대형 선박의 경우, $|z|z$ 과 $|z|z$ 는 작으므로 다음과 같이 모델링된다.

$$D_n(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -X_{|z|z}|z| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{|z|z}|z| - Y_{|z|z}|z| \\ 0 & -N_{|z|z}|z| - N_{|z|z}|z| \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

(3) 복원력과 모멘트

질량과 감쇠력 외에 선박은 중력과 부력의 영향을 받는다. 유체동역학적 관점에서, 중력과 부력을 복원력이라 부른다. 복원력은 선박의 크기와 형태, 메타센터의 높이, 무게중심과 부력중심의 위치에 달려 있다^[43,44,50].

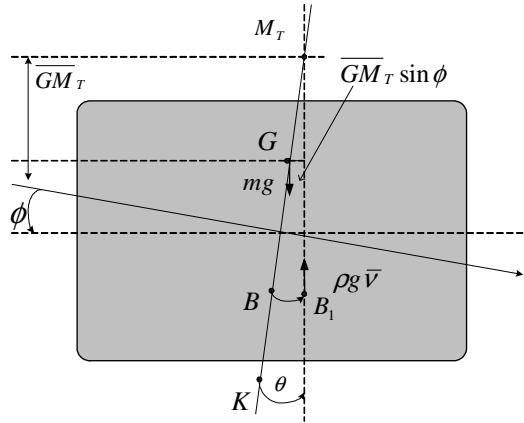


그림 2.2 횡축 메타센터 안정도

Fig. 2.2 Transverse metacentric stability

메타센터는 부심의 수직 연장선과 물 속에서 선체가 위치하거나 경사가 졌을 때, 새로 만들어지는 새로운 부심의 또 다른 연장선과의 이론적인 교점이다. 복원력과 모멘트 행렬은

$$\mathbf{g}(\mathbf{n}) = \begin{bmatrix} -\rho g \int_0^z A_{wp}(\zeta) d\zeta \sin\Theta \\ \rho g \int_0^z A_{wp}(\zeta) d\zeta \cos\Theta \sin\Phi \\ \rho g \int_0^z A_{wp}(\zeta) d\zeta \cos\Theta \cos\Phi \\ \rho g \nabla \frac{GM_T \sin\Phi \cos\Theta \cos\Phi}{GM_L} \\ \rho g \nabla \frac{GM_L \sin\Theta \cos\Theta \cos\Phi}{GM_L - GM_T} \sin\Phi \sin\Theta \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

이 된다. 여기서, $\mathbf{n} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ 는 위치 및 오일러 각, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, $A_{wp}(\zeta)$ 는 연직 방향 위치의 함수로 표현되는 선박의 수평면적, ∇ 는 배수량이다.

2.4 3차원 비선형 선박모델

오일탱커, 카고쉽, 여객선 등과 같이 해수면을 운항하는 선박은 xz 평면이 대칭되어, 조종 운동 방정식과 전진 속도방정식을 분리할 수 있고, 복원력 항은 선박의 메타센터 높이와 부심과 무게중심의 위치와 관련되어 조종운동에 영향력을 미치지 않으므로, 다음을 가정하면 3차원 비선형 선박모델을 유도할 수 있다.

- 1) 선박의 조종운동과 전진방향 속도를 분리할 수 있다.
- 2) 선박의 heave, roll, pitch를 무시할 수 있다. ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$)
- 3) 선체 고정좌표계의 원점이 선체 중심선에 위치한다. ($y_G = 0$)
- 4) 선박의 좌우가 대칭이다. ($I_{xy} = I_{yz} = 0$)

$$M\dot{\mathbf{v}} + C(\mathbf{v})\mathbf{v} + D\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (2.34)$$

여기서, $\mathbf{v} = [u \ v \ r]$,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\cdot u} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\cdot v} & mx_G - Y_{\cdot r} \\ 0 & mx_G - N_{\cdot v} & I_z - N_{\cdot r} \end{bmatrix},$$

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

$$c_{13} = (m - Y_{\cdot v})v + \left(mx_G - \frac{Y_{\cdot r} + N_{\cdot v}}{2} \right) r,$$

$$c_{23} = (m - X_{\cdot u})u,$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -X_{\cdot u} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\cdot v} & -Y_{\cdot r} \\ 0 & -N_{\cdot v} & -N_{\cdot r} \end{bmatrix}$$

이다.

2.4.1 전진방향 속도모델과 조종운동모델의 분리

일정 속도로 향해하거나 속도 변화가 작은 선박은 $U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u$ 가 되어 3차원 비선형 선박모델에서 전진방향 속도모델과 횡방향과 회두각에 대한 조종운동모델을 분리할 수 있다.

(1) 전진방향 속도모델

선형과 비선형 감쇠를 포함하는 전진방향 속도모델은 다음과 같다.

$$(m - X_{\cdot u})\dot{u} - X_{uu}u - X_{|u|u}|u|u = \tau_1 \quad (2.35)$$

여기서, τ_1 은 전진 방향 제어력의 합이다.

(2) 2차원 선형 조종운동모델

선형 조종운동모델은 항행 속도가 일정하고, 횡방향 속도와 회두각속도가 작다는 가정 하에서 구할 수 있다. ($u = u_0 \approx \text{constant}$, $v \approx 0$, $r \approx 0$)

(2.34)의 2,3행에 $u \approx u_0$ 을 대입하면,

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (2.36)$$

여기서, $\mathbf{v} = [v \ r]$,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\cdot v} & mx_G - Y_{\cdot r} \\ mx_G - Y_{\cdot r} & I_z - N_{\cdot r} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} &= \begin{bmatrix} (m - X_{\cdot u})u_0 r \\ (m - Y_{\cdot v})u_0 v + (mx_g - Y_{\cdot r})u_0 r - (m - X_{\cdot u})u_0 v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & (m - X_{\cdot u})u_0 \\ (X_{\cdot u} - Y_{\cdot v})u_0 & (mx_g - Y_{\cdot r})u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -Y_{\cdot v} & -Y_{\cdot r} \\ -N_{\cdot v} & -N_{\cdot r} \end{bmatrix}$$

이다. 선박이 하나의 조타기에 의해 제어된다고 가정하면,

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{b}\delta = \begin{bmatrix} -Y_{\delta} \\ -N_{\delta} \end{bmatrix} \delta \quad (2.37)$$

가 된다.

2.5 선형 조종운동모델

선박의 선형 조종운동모델은 전진방향 속도가 일정하고, 횡방향 속도와 회두각속도가 작다는 가정 하에서 구할 수 있다. ($u = u_0 \approx \text{constant}$, $v \approx 0$, $r \approx 0$) 결국, 선박의 전체 속도는 $U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u_0$ 가 된다. 전진방향 속도모델과 조종운동모델을 분리하면, 조종운동모델은 횡방향속도 v , 회두각속도 r , 회두각 ψ , 제어입력 조타각 δ 의 함수로 표현된다.

2.5.1 Davidson 과 Schiff 의 선형 조종운동모델(1946)

Davidson과 Schiff는 선형 강체동역학적 조종운동 방정식을

$$m(\dot{v} + u_0 r + x_G \dot{r}) = Y \quad (2.38)$$

$$I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u_0 r) = N$$

로 표현하고, 선형이론을 적용하여 유체동역학적 힘과 모멘트를

$$Y = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_\delta \delta_R \quad (2.39)$$

$$N = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\delta \delta_R$$

로 모델링하였다^[51].

Davidson과 Schiff의 선형 조종운동방정식을 벡터모델로 표현하면,

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} + \mathcal{M}(u_0) \mathbf{v} = \mathbf{b} \delta_R \quad (2.40)$$

이 된다. 여기서, $\mathbf{v} = [v, r]^T$ 은 상태벡터, δ_R 은 조타각,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_v & m x_G - Y_r \\ m x_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{M}(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & m u_0 - Y_r \\ -N_v & m x_G u_0 - N_r \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix}$$

이다.

(2.40)과 (2.41)의 선형 조종운동방정식은 (2.36)에서 $\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v}$ 의 마지막 열의 멱크모멘트 $(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})u_0 r$ 가 빠져있는 모델이다. 멱크모멘트는 선체를 회전시키는 불안정 모멘트로 알려져 있다^[48]. 또한 값이 작은 $X_{\dot{u}} u_0 r$ 과 $Y_{\dot{v}} u_0 r$ 항이 빠져있다. 생략된 항들은 유체 동역학적 코리올리스와 구심력과 관련된 항이다.

상태 벡터 $\mathbf{x} = [v, r]^T$ 와 $u = \delta_R$ 를 정의하면 다음과 같은 상대방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}_1 u \quad (2.42)$$

$$\text{여기서, } \mathbf{A} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}(u_0) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\mathbf{b}_1 = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

이다. 그리고, 각 계수는

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{-(I_z - N_{\dot{v}})Y_v + (mx_G - Y_{\dot{r}})N_v}{\det(\mathbf{M})} \\ a_{12} &= \frac{(I_z - N_{\dot{r}})(mu_0 - Y_r) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G u_0 - N_r)}{\det(\mathbf{M})} \\ a_{21} &= \frac{-(m - Y_{\dot{v}})N_v + (mx_G - N_{\dot{v}})Y_v}{\det(\mathbf{M})} \\ a_{22} &= \frac{(m - Y_{\dot{r}})(mx_G u_0 - N_r) - (mx_G u_0 - N_r)(mu_0 - Y_r)}{\det(\mathbf{M})} \quad (2.44) \\ b_1 &= \frac{-(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} + (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(\mathbf{M})} \\ b_2 &= \frac{-(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} + (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(\mathbf{M})} \end{aligned}$$

$$\det(\mathbf{M}) = (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}}) > 0$$

이다.

2.5.2 Nomoto의 선형 운동모델

Nomoto 등은 Davidson과 Schiff의 모델에 대한 다른 2가지의 모델 표현 방법을 제시하였다^[52]. 이 모델은 (2.40)에서 횡방향 속도 v 를 제거하여 회두각속도 r 과 조타각 δ_R 의 관계를 전달함수로 표현한 것이다. 회두각속도 r 과 조타각 δ_R 사이의 Nomoto 전달함수는

$$\frac{r}{\delta_R(s)} = \frac{K_R(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \quad (2.45)$$

이다.

유체력 미계수들과 관련된 Nomoto 전달함수의 파라미터는 (2.40)~(2.41)의 선형 모델에 대한 상태방정식 표현으로부터 유도할 수 있다.

Nomoto 전달함수의 파라미터는 (2.46)과 같다.

$$\begin{aligned} T_1 T_2 &= \frac{\det \mathbf{M}}{\det \mathbf{N}} \\ T_1 + T_2 &= \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det \mathbf{N}} \\ K_R &= \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det \mathbf{N}} \\ K_R T_3 &= \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det \mathbf{N}} \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\det \mathbf{M} = (m - Y_v)(I_z - N_r) - (mx_G - N_v)(mx_G - Y_r)$$

$$\det \mathbf{N} = Y_v(N_r - mx_G u_0) - N_v(Y_r - mu_0)$$

Nomoto 전달함수의 파라미터를 (2.47)과 같이 정의하면, 양의 조타각 $\delta > 0$ 에 대해 양의 회두각속도 $r > 0$ 의 관계를 갖는다.

$$\delta_R \triangleq -\delta : K_R \triangleq -K \quad (2.47)$$

(1) Nomoto 2차 모델

Nomoto의 2차 모델은 조타각 δ 에 대한 회두각 ψ 의 관계로 표현된다. 시간 영역에서는

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (2.48)$$

이 되고, 주파수 영역에서는

$$\frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{K(1 + T_3 s)}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (2.49)$$

가 된다. $K(s) = s\mathcal{P}(s)$ 이므로

$$\frac{K(s)}{\Delta(s)} = \frac{K(1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (2.50)$$

가 된다.

여기서, T_1 , T_2 , T_3 , K 는 선박의 조종성 지수이다. T_1 , T_2 는 추종 및 안정성 지수, T_3 는 추종성 지수, K 는 선회력 지수이다. T_1 , T_2 가 모두 양(+)일 때 선박은 침로가 안정하고, 둘 중 하나라도 음(-)이면 침로가 불안정하다. 침로 안정한 선박의 경우, T_1 , T_2 값이 작을수록 빠른 응답 속도를 갖고 침로 안정성이 좋다고 말한다. T_3 는 타각에 미분 효과를 주어 변침시 회두운동을 촉진시키는 작용을 한다. K 는 동일 타각에서 정상 회두각속도를 크게 하여 선회력을 크게 하는 값이다.

(2) Nomoto 1차 모델

Nomoto 2차 모델에서 유효시정수를 $T = T_1 + T_2 - T_3$ 로 놓으면 Nomoto 1차 모델을 구할 수 있다. 시간 영역은

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta \quad (2.51)$$

이고, 주파수 영역 전달함수는

$$\frac{\Psi(s)}{\Delta(s)} = \frac{K}{s(1 + Ts)} \quad (2.52)$$

이다.

카고쉽과 오일탱커에 대한 Nomoto 1차 및 2차 모델의 파라미터를 표 2.2에 나타내었다. 카고쉽은 조종성지수 T_1 과 T_2 가 모두 양의 값을 가지므로 침로가 안정한 선박이고, 오일탱커는 조종성지수 T_1 이 음의 값을 가지므로 침로가 불안정한 선박이다.

표 2.2 카고쉽과 오일탱커에 대한 Nomoto 모델 파라미터

Table 2.2 The parameters of Nomoto's models for cargo ship and oil tanker

	cargo ship (mariner class)	oil tanker (full loaded)
$L(m)$	161	350
$u_o(m/s)$	7.7	8.1
$\nabla(dwt)$	16,622	389,100
$K(1/s)$	0.185	-0.019
$T_1(s)$	118.0	-124.1
$T_2(s)$	7.8	16.4
$T_3(s)$	18.5	46.0

2.5.3 조타기 모델

조타기의 수학 모델은

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta_c \quad : \quad (|\delta| \leq \delta_{max}) \quad (2.53)$$

$$\dot{\delta} = \text{sgn}(\delta_c - \delta) |\dot{\delta}_{max}| \quad : \quad (|\delta| > |\delta_{max}|) \quad (2.54)$$

이 된다. 여기서, T_E 는 조타기의 시정수, $|\delta_{max}|$ 는 조타기의 최대 조타 각속도이다. T_E 와 $|\delta_{max}|$ 는 각국 선급협회 규정을 만족하도록 결정되며, 선박의 크기나 속력에 관계없이 일정한 값을 갖는다.

제 3 장 항로 결정 알고리즘

선박의 항로를 결정하는 일은 선박의 안전성과 효율에 영향을 주는 중요한 문제이다. 본 장은 전자해도 상에서 모폴로지(morphology)기법을 이용하여 항로를 결정하는 알고리즘을 설명하고 유전 알고리즘을 이용하여 최적화한다.

3.1 전자해도

해도는 항해의 안전을 위해 항해자가 눈으로 볼 수 없는 바다의 수심과 항해에 필요한 정보를 제공하는 도면이다. 지도가 자국의 목적에 따라 다양한 포맷으로 제작되는 반면 해도는 국제적인 공통 사용을 전제로 제작되기 때문에 국제수로기구(International Hydrographic Organization, IHO)의 엄격한 기준에 의해 제작된다. 디지털로 제작한 해도를 전자해도(Electronic Navigational Chart, ENC)라 하며, 이 전자해도 또한 국제적인 공통 포맷에 따라 각 국의 수로책임기관에서 제작된다^[53~56]. 전자해도를 제작하기 위한 국제수로기구의 표준 규격인 S-57 Edition 3은 표 3.1과 같다^[56].

표 3.1 S-57 Edition 3의 구조

Table 3.1 The structure of S-57 edition 3

Part 1	introduction including reference and definition
Part 2	theoretical data model
Part 3	data structure or data format for realization of basic law of data model encoding data appendix A : object catalogue appendix B : production specifications

특징 객체는 데이터의 효율적인 교환을 위해 표 3.2와 같은 네가지 객체로 구성된다.

표 3.2 특징 객체의 종류와 의미

Table 3.2 Types and meaning of the feature object

Feature Object	Meaning of feature object
Meta object	Feature object including information of other objects
Cartographic	Feature object including information about representation on map
Geo object	Feature object describing specific for real world object
Collection object	Feature object describing relation among other objects

특징 객체는 위도와 경도 좌표, 깊이로 표현되는 위치 정보인 공간 객체와 결합된다. S-57은 공간 객체를 표현하는 방법으로 벡터, 래스터, 매트릭스의 세 가지 방법을 제시하고 있다. 현재는 벡터 형식의 표현 방법이 주류를 이루고 있다.

전자해도는 항해 분야의 전자해도 표시시스템(Electronic Chart Display Information System, ECDIS)에 주로 사용되고, 해양관련 데이터 베이스로서 선박 및 항만 관제, 해양경찰 및 해군의 구조구난, 오염방제, 연안역 관리 등의 여러 해양분야에서 활용 가치가 증가되고 있다^[57,58]. IMO의 규정에 따라 ECDIS의 장착이 의무화되면서 ECDIS를 이용한 자동화 관련 연구들이 진행되고 있다. 이러한 ECDIS를 IHO의 『ECDIS에 관한 용어집』, IMO의 『ECDIS Performance Standard』는 "항해용 센서로부터 얻어지는 선박의 위치정보와 SENC(Systems Electronic Navigational Chart)로부터 선정된 정보를 표시하고, 항해계획과 항해감시 목적에 따라

부가적인 항해관련 정보를 표시하며 항해자를 돕는 것"으로 정의하고 있다.

ECDIS는 항해관련 정보를 표시하는 항해시스템으로 선박의 위치 및 이동상황 표시, 해도 전시, 항로감시(Route monitoring), 항로설계(Route planning), ARPA Radar Target 전시, 레이더 이미지 표시 등 각종 부가적인 기능을 보유한 소프트웨어와 PC 혹은 워크스테이션과 같은 하드웨어로 구성된다. 그림 3.1은 ECDIS 화면의 일부를 보여주고 있다.

ECDIS는 실시간 항해정보 제공, 항로설계, 항로설정, 항로감시, 항해이력 관리, 레이더 이미지 중첩 등의 기능을 제공한다. 따라서 ECDIS를 항해에 활용함으로써 레이더, 해도, 컴퍼스 등 다양한 장비를 통합하여 선박의 위치와 주변 상황을 한 화면에서 감시가 가능하고, 종이해도 사용에 따른 불편함을 제거하여 간편하게 자선의 위치를 확인할 수 있어 항로설계와 항로수정 등의 작업이 가능하여 인력을 절감하고 수작업을 감소시킬 수 있다. 악천후나 야간 항해와 같이 시야 확보가 어려운 경우에도 레이더와 전자해도를 이용하여 주변의 운항 선박과 장애물 확인이 가능하여 항해 안전을 도모할 수 있다. 또한, 디지털 컴퓨터를 이용한 항해관련 정보의 관리와 검색이 용이하고, 해도 개보, 선박운항 등 항해정보를 관리하는 것이 용이하다. 본 절은 이러한 ECDIS상에서 자동으로 항로를 결정하는 항로 결정 알고리즘을 제안하고 유전알고리즘을 이용하여 항로를 최적화하는 연구를 수행한다.

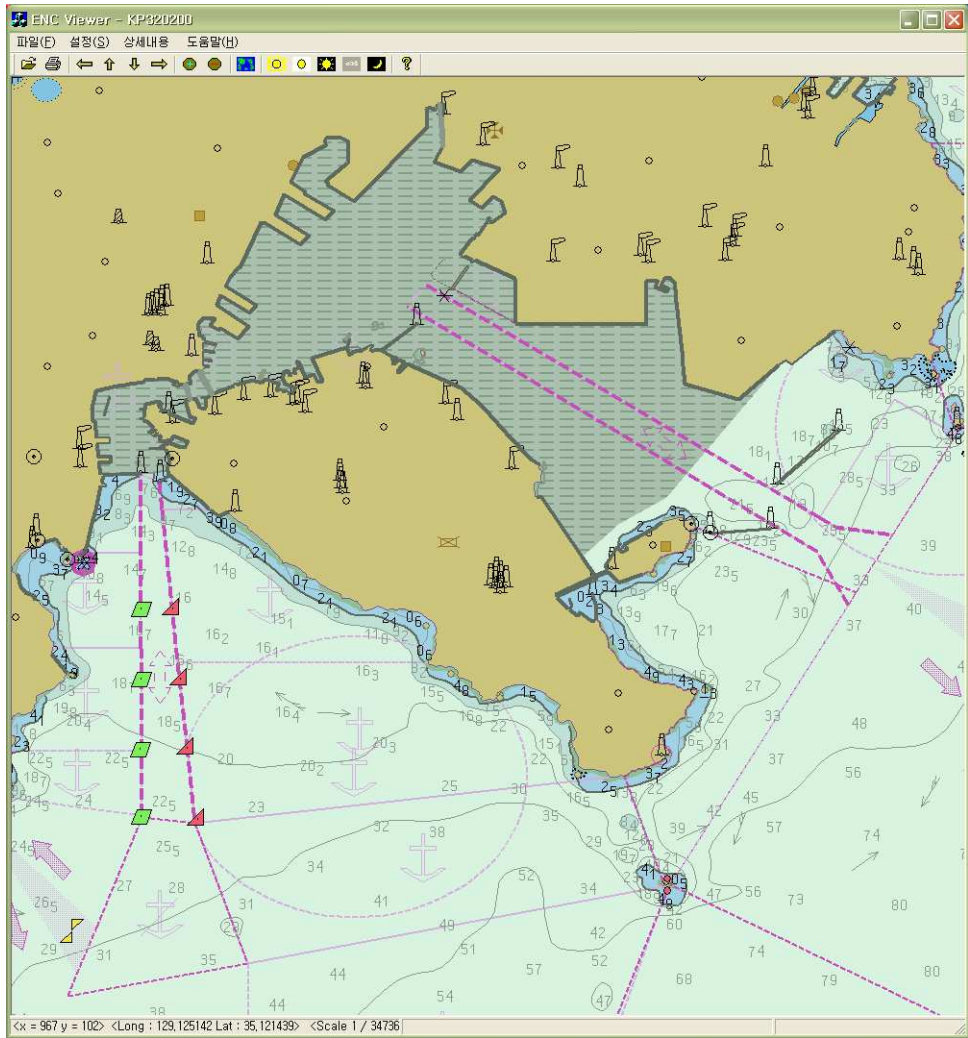


그림 3.1 ECDIS 화면 예
 Fig. 3.1 Example of ECDIS

3.2 모폴로지 기법을 이용한 항로 결정 알고리즘

모폴로지는 형태처리 또는 형태론으로 번역되는 영상의 형태적인 면을 조작하는 영상처리 기법이다. 모폴로지는 경계, 골격, 블록과 같은 영역 형태를 표현하거나 서술하는 데 있어 유용한 영상 요소들을 추출하기 위한 도구로서 수학적 형태론의 개념으로 사용된다^[45,59]. 이 기법은 영상의 전처리 작업이나 초기 객체분류 등에 사용되나 이러한 처리 뒤에 이어서 물체의 내재된 구조를 명확히 하는 데도 이용된다. 모폴로지는 물체의 최외각선의 1픽셀을 조작함으로써 수행된다. 이러한 모폴로지 기법은 침식(erosion)연산, 팽창(dilation)연산, 제거(elimination)연산, 채움(closing)연산 등이 있다.

전자해도는 해도의 표현방식에 따라 벡터 방식과 래스터 방식으로 구분할 수 있다. 벡터 방식은 원하는 지역의 데이터를 확대하고 축소하는 것이 용이하고, 데이터의 양이 작지만, 오버레이가 어려운 단점을 갖는다. 래스터 방식은 데이터 구조가 간단하고 오버레이가 쉽지만 용량이 크고 데이터의 갱신이 어렵다는 단점을 갖는다.

벡터 방식의 전자해도를 화면에 표시하기 위해 먼저 화면에 표시될 전자해도의 축적을 구하고 화면의 해상도에 따라 화면 한 픽셀의 거리를 계산한다. 계산된 픽셀의 거리에 따라 전자해도 벡터 데이터를 점장하여 화면에 표시하게 된다. 벡터 방식의 전자해도는 데이터 형식은 벡터이지만, 실제로 화면에 표시되는 과정에서 픽셀 정보로 변환된다. 그러므로, 전자해도의 표현방식에 관계없이 실제로 화면에 나타나는 정보는 픽셀 단위 정보가 된다.

본 절의 목적은 선박의 항로를 결정하는 것으로 전자해도의 표현방식에 관계없이 화면에 표시되는 픽셀 정보를 활용하여 모폴로지 기법을 통해 항로를 결정하는 연구를 수행한다. 모폴로지 기법을 이용한 항로결정 알고리즘의 절차를 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 3.2와 같다.

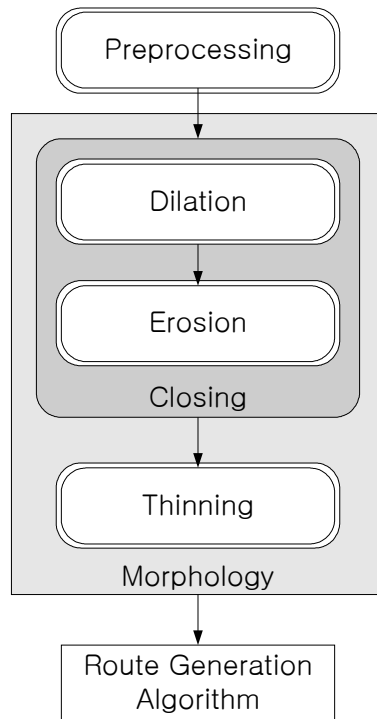


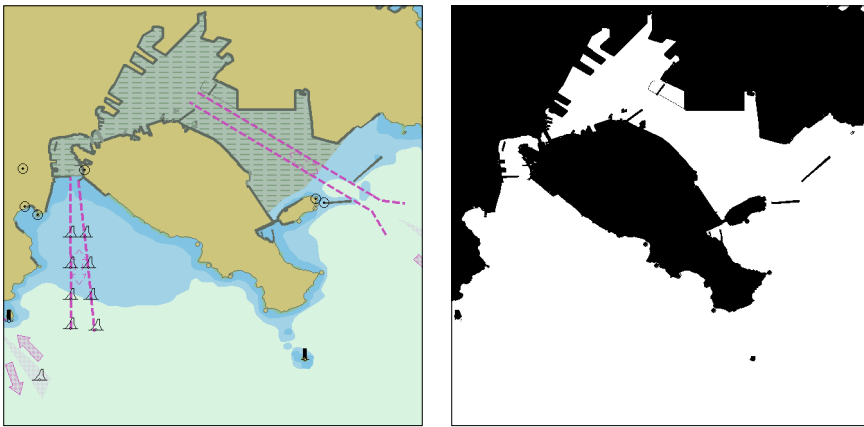
그림 3.2 항로 결정 알고리즘의 절차

Fig. 3.2 Procedure of a route decision algorithm

전처리 과정은 전자해도 영상의 계산량을 줄이기 위해 전자해도 영상을 축소하고 2진영상으로 변환한다. 팽창연산과 침식연산으로 구성된 채움 연산은 세선화 알고리즘 수행시 해안선의 작은 골과 같은 영역이 세선화되지 않도록 해도상의 해안선을 정리하고 해안선에서 홀과 같은 영역을 채우기 위해 사용된다. 채움연산은 원 영상에서 항로의 중요 정보를 잃지 않는 범위 내에서 반복적으로 연산하는 것이 필요하다. 채움연산된 영상으로부터 세선화 알고리즘을 통해 선박이 운항 가능한 영역의 정보를 선으로 획득한다. 세선화된 영상으로부터 항로 결정 알고리즘을 이용하여 항로를 결정한다. 세선화 영상으로부터 항로를 결정하므로써 장애물의 골에 빠지지 않고 탐색 공간 내에서 항로를 결정할 수 있다.

3.2.1 전처리 과정

전자해도의 모든 픽셀에 대해 영상처리 연산을 수행하면 계산량이 증가되므로 목적에 부합하도록 전자해도를 축소하여 사용한다. 본 논문은 한 픽셀을 선폭을 고려하여 33m로 하였고, 계산량을 줄이기 위해 항해 가능 영역과 불가능 영역에 대하여 2진 영상으로 변환하였다. 그림 3.3은 전자해도 영상을 2진 영상으로 변환한 예를 나타낸 것이고, 그림 3.4는 2진 영상의 2진 데이터의 예를 나타낸 것이다.



(a) An original image

(b) A binary image

그림 3.3 원 영상과 2진 영상

Fig. 3.3 An original image and a binary image

1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

그림 3.4 2진 데이터의 예

Fig. 3.4 An example of a binary coded data

3.2.2 채움연산 과정

채움연산은 팽창연산 다음에 침식연산을 수행하는 알고리즘이다.

(1) 팽창연산

팽창연산은 물체의 최 외각 픽셀을 확장하여 물체 안의 홀과 같은 빈 공간을 메우는 역할을 하거나 서로 짧은 거리만큼 끊어진 영역을 연결시켜준다. 팽창연산을 사용하여 육지와 같은 항해 불가능 영역을 확장하고, 바다와 같은 항해 가능한 영역을 축소한다. 팽창연산은 그림 3.5와 같은 마스크를 사용한다^[42,59].

0	0	0
0	0	0
0	0	0

그림 3.5 팽창 연산 마스크

Fig. 3.5 Dilation mask

마스크가 영상 위를 지나갈 때, 영상의 3×3개의 픽셀 값을 마스크 값과 비교하여 모두 일치하면 가운데 픽셀값에 원 영상값을 할당하고, 정확히 일치하지 않으면 가운데 픽셀값을 새로운 값 1을 할당하여 물체의 팽창이 일어난다. 그림 3.6은 5×5 픽셀에 대한 팽창연산의 예를 나타낸 그림이고, 그림 3.7은 50×50 픽셀영상에 팽창연산을 적용한 결과이다.

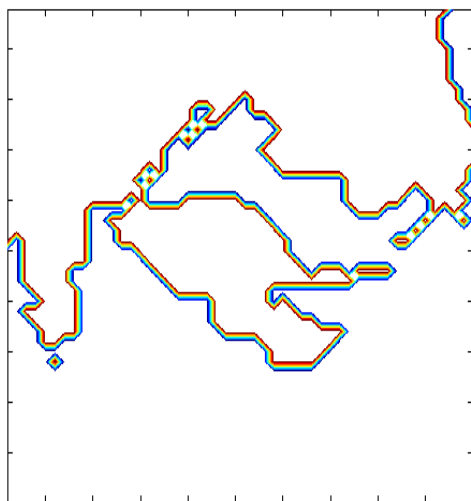
1	1	1	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

⇒

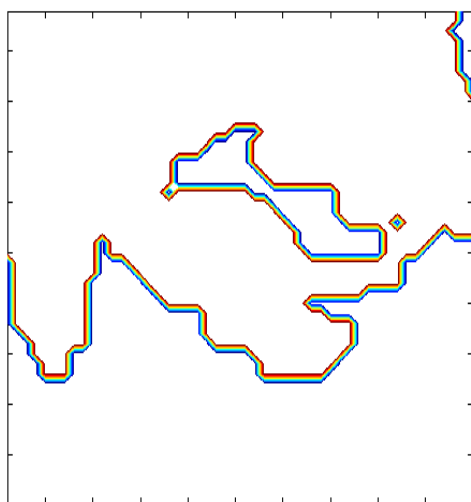
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	0	1	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

그림 3.6 팽창 연산의 예

Fig. 3.6 An example of dilation



(a) An original image



(b) A resultant dilation image

그림 3.7 원 영상과 팽창 연산 후의 결과 영상
Fig. 3.7 An original image and a resultant dilation image

(2) 침식연산

침식연산은 물체에 대해 배경을 확장시키고 물체의 크기를 축소하는 역할을 한다. 침식연산은 주로 물체와 배경 사이의 스파크 잡음 제거와 같이 전체 영상에서 아주 작은 물체를 제거하거나 전체 영상에서 배경 확장에 따라 물체를 축소하는 역할을 한다^[42,59]. 본 논문에서 침식연산은 육지와 같은 항해 불가능 영역은 축소하고 바다와 같은 항해 가능한 영역은 확장한다. 연산은 그림 3.8과 같은 침식 마스크를 사용하여 이루어진다. 3×3 마스크가 영상 위를 지나갈 때, 원 영상의 3×3개의 픽셀 값을 침식 마스크 값과 비교하여 모두 일치하면 가운데 픽셀값에 원 영상값을 할당하고, 정확히 일치하지 않으면 가운데 픽셀값에 새로운 값 0을 할당하여 물체의 축소가 일어나도록 한다. 그림 3.9는 5×5 픽셀에 대한 침식 연산의 예를 나타낸 그림이고, 그림 3.10은 50×50 픽셀영상에 침식연산을 적용한 결과이다.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

그림 3.8 침식 마스크

Fig. 3.8 Erosion mask

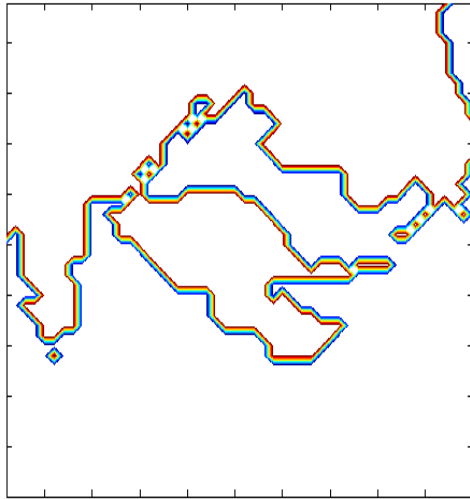
1	1	1	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

 \Rightarrow

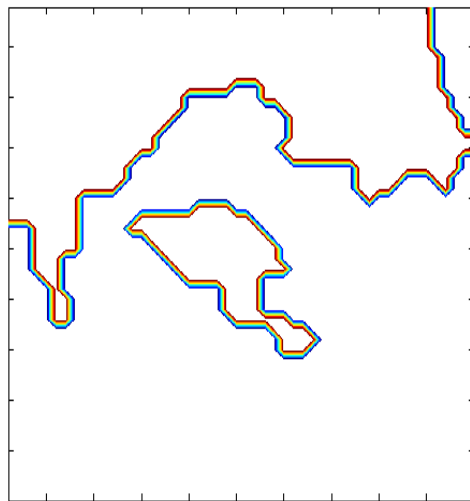
1	1	1	1	1
1	1	0	1	1
1	0	0	1	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

그림 3.9 침식 연산의 예

Fig. 3.9 An example of erosion



(a) An original image



(b) A resultant erosion image

그림 3.10 원 영상과 침식 연산 후의 결과 영상

Fig. 3.10 An original image and a resultant erosion image

(3) 채움연산

채움연산은 팽창연산 다음에 침식연산을 수행한다. 채움연산은 팽창이 먼저 일어나므로 작은 홀들은 메워지고 침식연산 때 원 영상의 크기로 복원된다^[33,47]. 그림 3.11은 채움연산에 사용되는 마스크를 나타낸 것이고, 그림 3.12는 50×50 픽셀의 영상에 채움 연산을 적용한 결과이다.

0	0	0	1	1	1
0	0	0	1	1	1
0	0	0	1	1	1

그림 3.11 채움 연산 마스크

Fig. 3.11 Closing mask

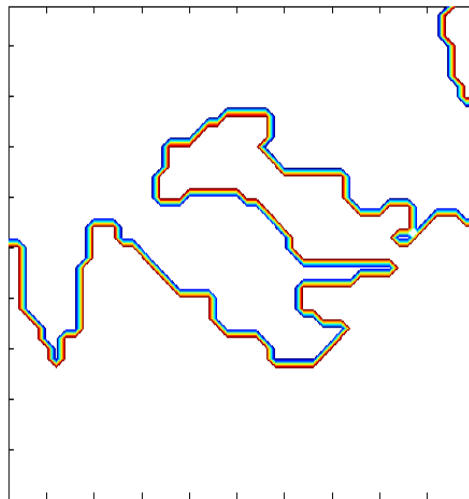


그림 3.12 채움 연산 후의 결과 영상

Fig. 3.12 A resultant closing image

3.2.3 세션화 알고리즘

세션화 알고리즘은 두꺼운 선을 하나의 선으로 표현함으로써 영상의 골격을 추출하는 영상처리 기법이다^[42,59]. 기본적인 개념은 두꺼운 선을 최 외각으로부터 한점씩 벗겨나가서 마지막에 남는 선 성분을 추출하는 것이다. 윤곽선 추출과 비교하여 보면 윤곽선 추출은 외각의 선 성분을 추출하는 반면 세션화는 가운데 선을 추출하는 방법이다. 즉 영상의 본질적인 구조를 보존한 채, 선도형을 추출하는 조작이다. 세션화는 도형의 연결성은 변화시키지 않고 선으로 변화시켜 도형의 결합 관계의 특징을 구해, 글씨나 도면 등에서 선의 구조를 해석하는 데 사용된다. 세션화 알고리즘은 선의 원래 형태를 유지하는 방법에 따라 여러 가지 방법이 제안되어 있다^[60~63]. 본 논문은 세션화 알고리즘으로 3×3 윈도우를 이용한 세션화 알고리즘^[59]과 구조요소를 이용한 세션화 알고리즘^[42]을 사용한다.

(1) 3×3 윈도우를 이용한 세션화 알고리즘

3×3 윈도우를 이용하여 세션화하는 알고리즘은 다음과 같다.

<단계 1> 2개 이상, 6개 이하 이웃 픽셀이 있어야 한다. 이 조건은 끝점이나 영역 내부의 점은 지워서는 안 된다는 것을 의미한다.
<단계 2> 두 개 영역을 연결하는 픽셀은 지워서는 안 된다. 이 픽셀을 지운다면 영역 개수가 달라지게 된다.

세션화 알고리즘에서 사용하는 3×3 윈도우를 그림 3.13에 마스크 형식으로 나타내었다.

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

그림 3.13 3×3 윈도우를 이용한 세션화 알고리즘에 사용되는 픽셀 배열
Fig. 3.13 Pixel array used for a thinning algorithm using 3×3 window

<단계 1>과 <단계 2>를 자세히 나타내면 다음과 같다.

<단계 1>

① 다음의 조건을 만족하면 점 P_I 을 삭제한다.

㉠ $2 \leq \mathcal{M}(P_1) \leq 6$

㉡ $\mathcal{S}(P_1) = 1$

㉢ $P_2 \cdot P_4 \cdot P_6 = 0$

㉣ $P_4 \cdot P_6 \cdot P_8 = 0$

여기서, $\mathcal{M}(P_1)$ 은 P_1 의 0이 아닌 값을 가진 이웃의 수로 $\mathcal{M}(P_1) = P_2 + P_3 + \dots + P_8 + P_9$ 이고, $\mathcal{S}(P_1)$ 은 $P_2, P_3, \dots, P_8, P_9$ 의 정렬된 순서에서 0~1 천이의 횟수이다.

<단계 2>

② 다음의 조건을 만족하면 외곽선 점 P_I 을 삭제한다.

㉠, ㉡, ㉢은 <단계1>과 동일하다.

㉣ $P_2 \cdot P_6 \cdot P_8 = 0$

<단계 1>과 <단계 2>를 교대로 실행한다.

더 이상 삭제될 점이 없을 때까지 반복적으로 적용되고, 삭제될 점이 없을 때, 알고리즘은 종료되고, 결과 영상은 영역의 골격이 된다.

(2) 구조요소를 이용한 세션화 알고리즘

구조요소 B 에 의한 집합 A 의 세션화는 $A \otimes B$ 로 표기하며, 적중/비적중 변환으로 (3.1)과 같이 정의한다.

$$A \otimes B = A - (A \otimes B) = A \cap (A \otimes B)^c \quad (3.1)$$

A의 세선화를 대칭적으로 하기 위한 더 유용한 표현식은 구조요소들의 열 $\{B\} = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_n\}$ 을 기초하여 구성된다. 여기서, B_i 는 B_{i-1} 가 회전된 형태이다. 구조요소를 이용한 세선화 알고리즘은 (3.2)와 같이 정의되며 구조요소의 열은 그림 3.14와 같다. 그림에서 '×'표시는 '관계없음'을 의미한다.

$$A \otimes \{B\} = ((\dots((A \otimes B_1) \otimes B_2) \dots) \otimes B_n) \quad (3.2)$$

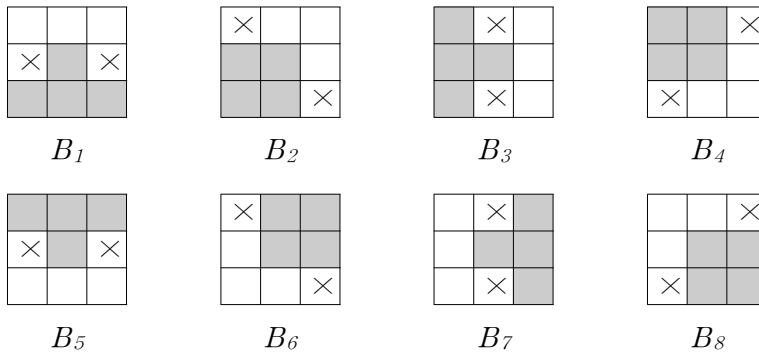
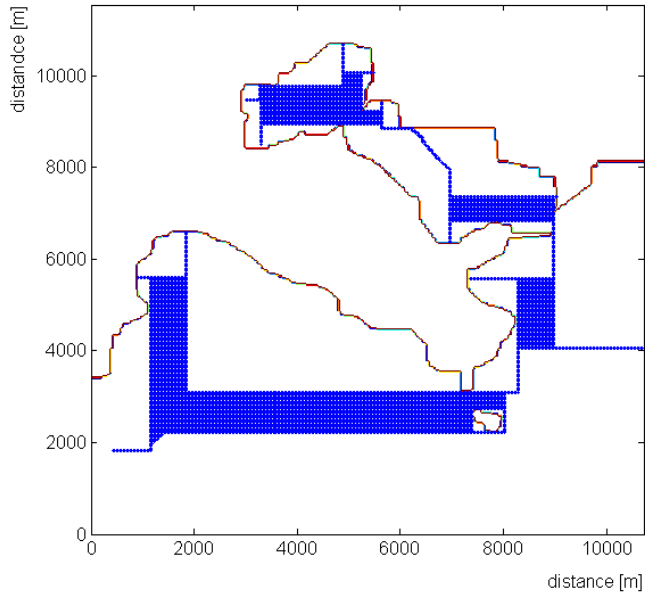


그림 3. 14 구조요소들의 열

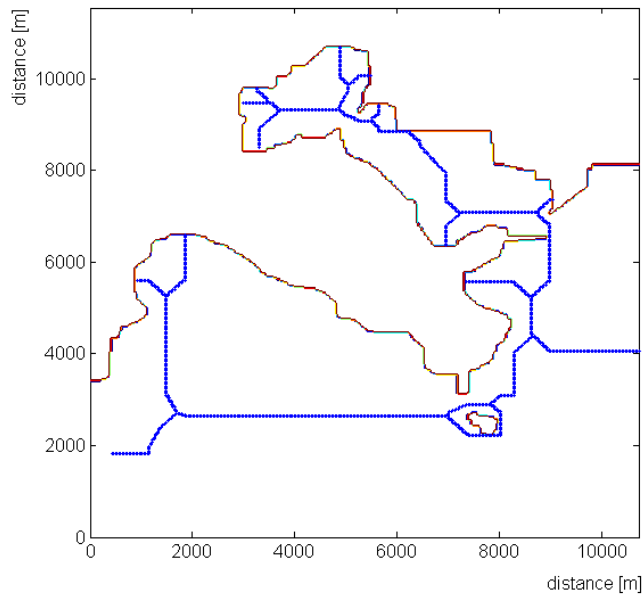
Fig. 3.14 Arrays of structural elements

이 과정은 B_1 으로 한번 통과시켜 A 를 세선화하고, 그 다음 이 결과를 B_2 로 한번 통과시켜 세선화하고, 이 과정을 B_n 으로 한번 통과시켜 A 를 세선화할 때까지 계속된다. 이 전과정은 더 이상의 변화가 일어나지 않을 때까지 반복된다.

3×3 윈도우를 이용한 세선화 알고리즘을 적용하여 그림 3.15 (a)와 같은 세선화 영상을 구한 후, 구조요소를 이용한 세선화 알고리즘을 적용하여 3.15(b)와 같은 최종 세선화 영상을 구했다. 보는 바와 같이 항행 가능한 영역에 대하여 세선화가 되어 있음을 확인할 수 있다. 세선화 영상으로부터 항로를 결정하므로써 장애물의 골이나 사점에 빠지지 않고 강인하게 항로를 결정할 수 있다.



(a) A thinning image using 3×3 window



(b) A thinning image using structural elements

그림 3.15 세션화 결과 영상

Fig. 3.15 Resultant thinning image

3.2.4 항로 결정 알고리즘

세션화된 영상으로부터 항로를 결정하는 알고리즘은 그림 3.16과 같다. 시작점과 목표점이 입력되면, 항로 결정 알고리즘은 시작점과 목표점 사이에 장애물의 유무를 판단하여 직선 항해가 가능하면 시작점과 목표점을 직선으로 항로를 결정하고, 장애물이 있는 경우 세션화 영상을 이용하여 장애물을 회피한다. 세션화 영상은 항해 가능한 영역이 선으로 표현되어 있어 세션화 영상을 따라 이동하면 목표점에 도달할 수 있다. 그림 3.17과 3.18은 안전수심 5[m]와 10[m]를 고려하여 항로 결정 알고리즘에 따라 구한 항로를 나타낸다.

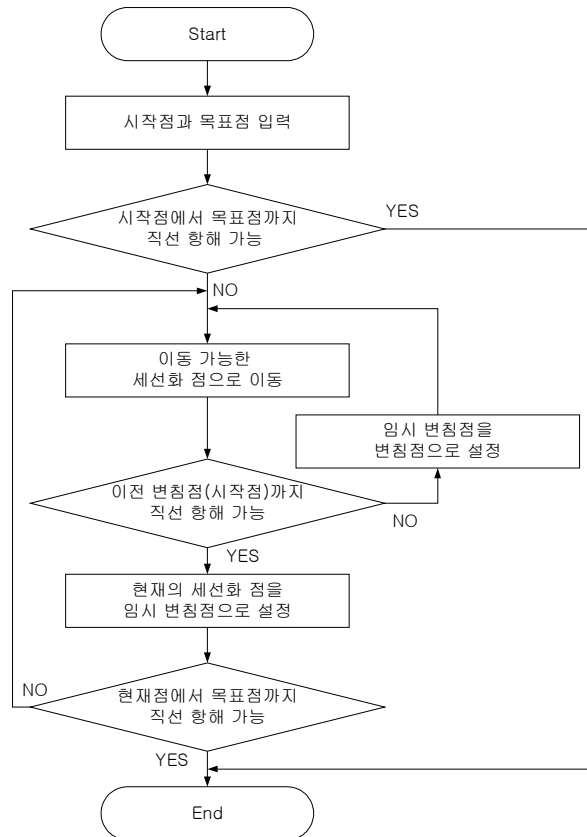


그림 3.16 항로 결정 알고리즘

Fig. 3.16 Routedecision algorithm

그림 3.17 항로 결정 시뮬레이션 결과(안전수심 5 [m])

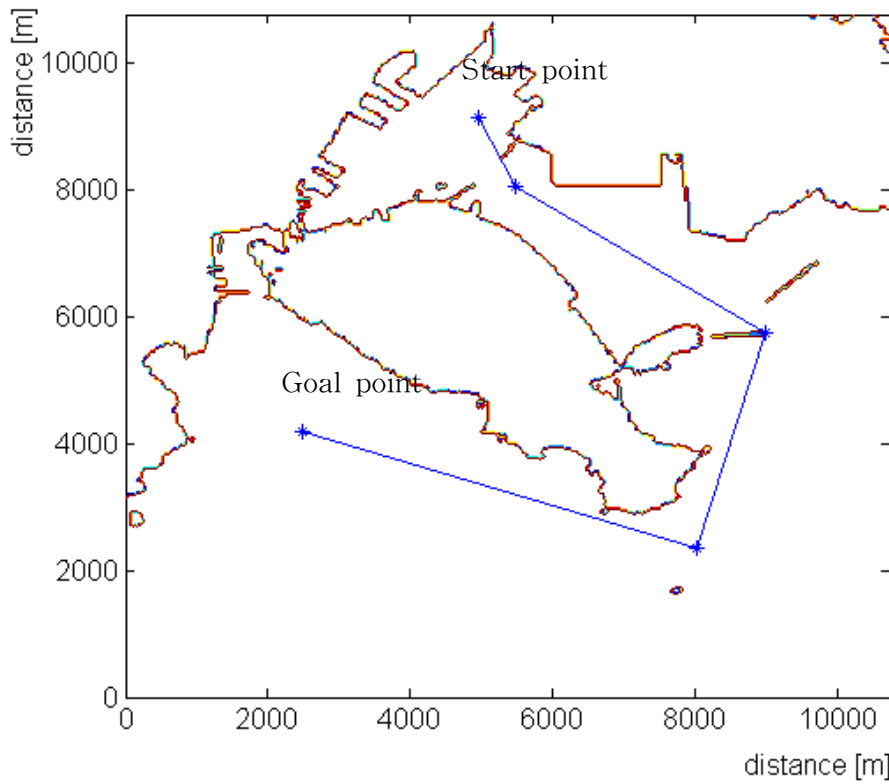


Fig. 3.17 A result of route decision simulation(safe water depth : 5 [m])

그림 3.18 항로 결정 시뮬레이션 결과(안전수심 10 [m])

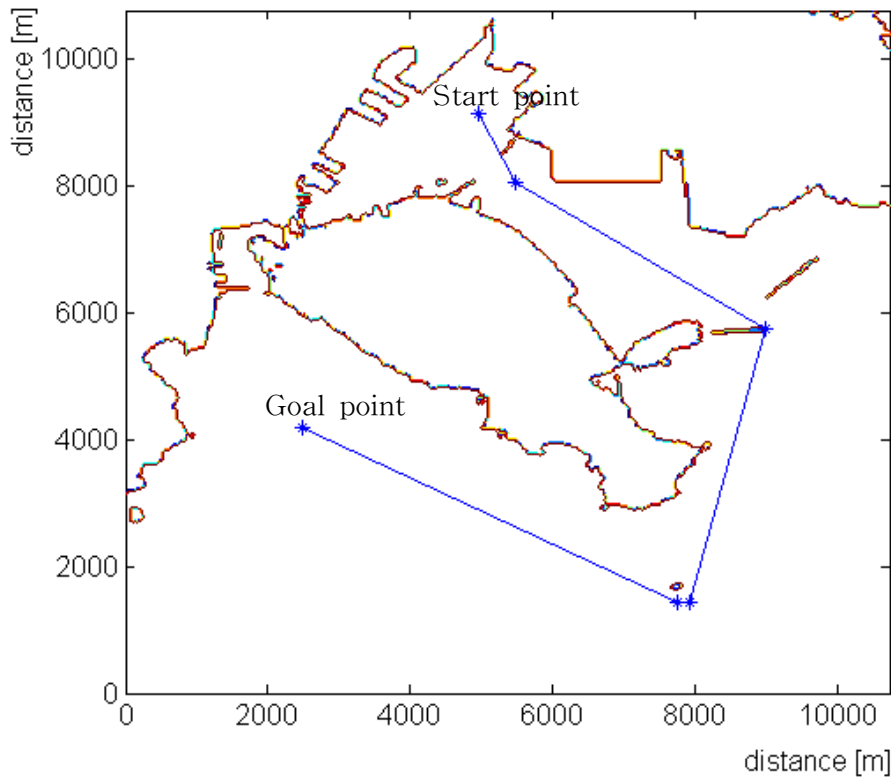


Fig. 3.18 A result of route decision simulation(safe water depth : 10 [m])

3.3 유전 알고리즘을 이용한 항로의 최적화

모폴로지 기법을 이용한 항로 결정 방법은 전자해도 상에서 간단하게 항로를 결정할 수 있는 유효한 방법이다. 이 방법은 장애물의 끝이나 사점 등에 빠지지 않고 항로를 결정하는 장점을 갖는다. 그러나 이 방법은 선박의 특성이나 경제성을 고려한 항로를 찾는 문제를 다루기에 적합하지 못하다. 이는 최적화할 항로를 표현할 자유도가 적기 때문이다. 따라서 본 절에서는 모폴로지 기법을 이용한 항로 결정 알고리즘을 수정하여 최적 항로를 결정하는 항로 결정 알고리즘을 제안한다. 아울러 유전 알고리즘을 이용하여 항로를 최적화한다.

3.3.1 항로 결정 알고리즘의 수정

블록 다각형 A, B, C가 서로 연결된 그림 3.19에서 점1과 점2는 블록 다각형 A 안에 존재하므로 점1과 점2는 직선으로 연결이 가능하다. 점1과 점3을 연결하기 위해서는 다각형 A, B의 경계선 $\overline{aa'}$ 와 다각형 B, C의 경계선 $\overline{bb'}$ 를 거쳐야한다. 그러므로, 점1과 점3을 연결하는 문제는 경

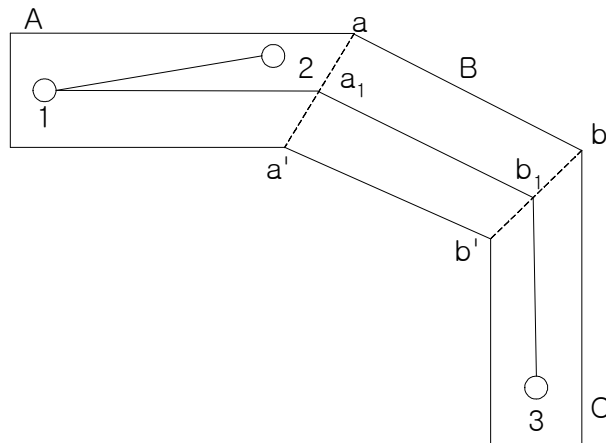


그림 3.19 항로 결정의 예

Fig. 3.19 An example of route decision

계선 $\overline{aa'}$ 에서 점 a_1 과 경계선 $\overline{bb'}$ 에서 점 b_1 을 선택하는 문제가 된다. 이를 전자해도 상에서 향로를 결정하는 문제에 적용할 수 있다. 전자해도를 블록 다각형 형태의 클러스터 또는 셀로 분할한다면, 향로를 결정하는 문제는 블록 다각형들의 경계선의 임의의 한 점들을 선택하는 문제로 변환할 수 있다. 이러한 문제의 변환은 향로의 최적화 작업을 수행하는 데 유용하다. 전자해도 상에서 블록 다각형 형태의 클러스터나 셀로 분할하는 작업은 그 자체만으로도 복잡한 작업이므로 채움 연산된 영상과 세션화된 영상을 바탕으로 다각형들의 경계선을 결정하는 방법을 고찰한다.

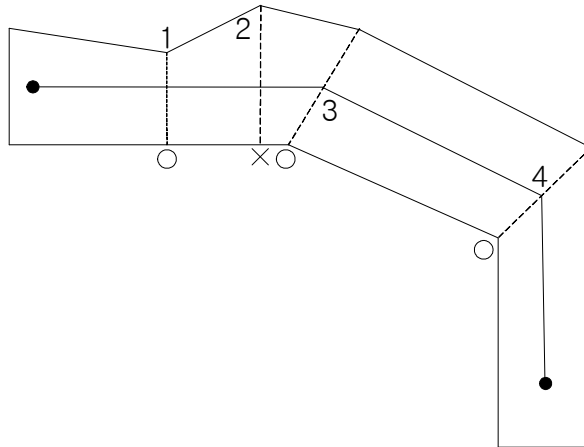


그림 3.20 경계선 결정 예

Fig. 3.20 An example of border lines

그림 3.20에서 보는 바와 같이 경계선으로 결정할 수 있는 조건은

① 중심축선, 즉 세션화된 선분이 꺾이는 부분(3과 4점)

② 1지점과 같이 외곽 선이 밖으로 나가는 경우

단, 2지점과 같이 안으로 들어오는 경우는 자체가 블록 다각형이 되므로 고려할 필요가 없다.

③ 세션화 선분이 분기하는 경우

이다.

3.3.2 유전 알고리즘

유전알고리즘은 자연 진화현상을 프로그램 상에서 구현한 것으로 다양한 최적화 문제 해결에 응용되고 있다^[65~67]. 유전알고리즘은 인위적으로 진화 현상을 일으켜 주어진 문제의 탐색영역(해 공간) 안에서 점진적으로 해를 찾는 최적화 알고리즘이다. 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 자연 진화기구를 모방한 연산자를 사용한다. 유전 알고리즘의 연산과정은 그림 3.21과 같다.

(1) 염색체 표현과 초기집단의 생성

일반적으로 많이 사용하는 염색체 표현 방법은 이진 코딩, 그레이 코딩, 실수 코딩 등이다^[67]. 어떤 염색체 표현 방법을 선택할 것인지는 전적으로 주어진 문제와 사용하는 알고리즘에 달려 있다. 염색체는 변침점 좌표의 정보를 잘 표현할 수 있어야 한다. 변침점은 경계선분의 한 점이 되므로 x 축과 y 축 좌표 값 대신 경계선분의 한 값을 실수로 표현하여 실수코딩을 사용한다.

초기집단은 인위적인 진화현상을 일으킬 집단으로, 다수의 염색체 개체들로 구성된다. 이들은 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 거치는 동안 변경되어 세대가 진행될수록 더 많은 해의 인자(정보)를 보유하게 된다. 초기집단을 생성하는 방법에는 무작위 초기화법과 사전지식이나 경험을 기반으로 하는 유도된 초기화법이 있다. 본 논문에서는 무작위 초기화법을 통하여 초기 집단을 생성한다.

(2) 유전 연산자

유전 알고리즘의 핵심은 자연계의 진화현상을 알고리즘 형태로 모방하여 구현한 재생산, 교배, 돌연변이 연산자에 있다. 이 연산자들에 의해 유전 알고리즘의 성능이 좌우되므로 적합한 연산자의 선택은 매우 중요하다.

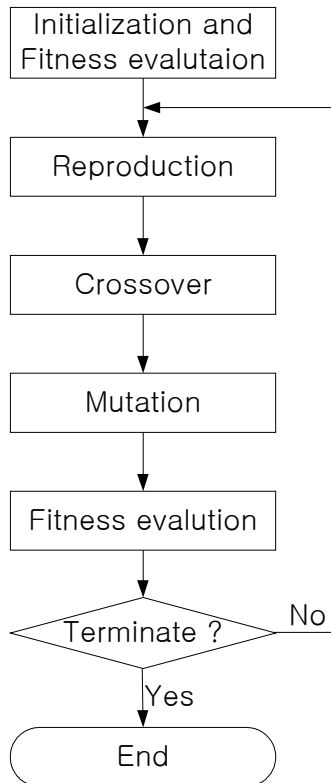


그림 3.21 유전 알고리즘의 연산

Fig. 3.21 Operation of a genetic algorithm

1) 재생산

자연에서 환경은 적합한 생물들이 더 높은 생존 기회를 갖도록 이들의 생존을 조절하는 기능을 갖는다. 재생산은 적자생존 또는 자연도태 현상을 모방한 인위적인 메커니즘이다. 알고리즘으로 구현한 재생산 연산자는 적합도 값을 기반으로 약한 개체는 도태시키고, 강한 개체를 선택함으로써 다음 세대에 강한 개체의 유전인자를 넓게 퍼지도록 해준다. 본 논문은 일반적으로 많이 사용되고 있는 루울렛휠 선택에 기초한 재생산 연산자를 사용하였다^[67].

2) 교배

자연계의 생물들은 그들의 유전자를 서로 섞는 유성생식을 통하여 자손을 생산하게 되는 데, 이런 성적 재생산을 알고리즘 형태로 흉내낸 것이 교배이다. 교배는 탐색 공간상의 가능한 새로운 점을 찾기 위하여 교배급원으로부터 부모 염색체 쌍을 임의로 선택하고 교배점 이후의 비트들을 서로 교환 결합함으로써 자손을 생성한다. 유전자를 절단하는 교배점은 염색체 내에서 임의로 선택된다. 이러한 연산은 교배된 자손의 수가 어버이 집단의 크기와 같을 때까지 반복된다. 교배 연산자로 실수코딩에서 사용하는 산술적 볼록 교배를 적용하여 사용하였다^[67].

3) 돌연변이

모의진화가 계속되는 동안 재생산과 교배 연산자는 집단을 더욱 강하게 해주고 이로 인해 염색체들은 서로 닮아가게 된다. 이러한 현상은 세대말기에는 바람직하지만 세대 초기에 발생하게 되면 유전자의 다양성 결핍으로 준최적해와 사점에 빠지게 되는 요인이 된다. 재생산과 교배 연산자는 지역해나 사점으로부터 벗어나게 하는 메커니즘을 가지고 있지 않다. 이러한 원치 않는 해로부터 벗어나기 위해 돌연변이 연산자가 사용된다. 이는 자연계의 돌연변이를 모방한 것으로 염색체 내의 비트를 돌연변이 확

를을 토대로 변경시킴으로써 초기세대에서 모든 염색체의 특정비트가 고정되는 것을 방지하고 탐색영역을 확대한다. 돌연변이 연산자로는 염색체의 요소들을 차례대로 선택하고 이들을 돌연변이 확률에 따라 특정 범위 내에서 발생하는 임의의 실수로 교체하는 균등 돌연변이를 사용하였다^[53].

4) 엘리트 전략

모의 진화 과정에서 세 가지 유전 연산자의 확률적 속성 때문에 한 세대의 최적 개체가 다음 세대에 살아남지 못하고 소멸되는 경우가 발생할 수 있다. 최적 개체의 소멸은 좋은 특성을 갖는 유전자를 잃는 결과를 야기하여 탐색을 침체시킬 수 있다. 따라서 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되도록 하는 것이 필요한 데 이를 엘리트 전략이라고 한다. 본 논문은 이를 적용하였다.

단계 1 : 이전 세대의 최적 개체를 저장한다.

단계 2 : 일련의 모의 진화 과정 수행 후 현 세대에서 최적 개체가 생존했는지 확인한다.

단계 3 : 소멸된 경우, 저장된 최적 개체를 현 세대의 가장 약한 개체나 임의 개체와 교환한다.

(3) 적합도 평가

자연계의 생물들은 생존 경쟁을 통해 끊임없이 투쟁하며 환경에 적응해 가는데 한 생물의 생존능력은 그 환경에 대한 적합도를 반영한다. 환경에 대한 생물의 적응능력은 유전 알고리즘에서는 개체의 적합도를 평가하는 과정을 통해 반영된다.

세 연산을 거쳐 새로운 집단이 완성될 때마다 개체들의 적합도가 평가 되는데 이는 대개 목적함수로부터 계산된다. 유전알고리즘에서 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려되어야 한다. 그러므로 적합도 함수는 최대화 문제의 형태로 기술되어야 하고 음의 값을 가져서는

안 된다.

최적화 목적은 선박의 안전성을 확보하면서 운항 경제성을 최대화하는 항로를 결정하는 것이다. 이를 위해 적합도 함수는 운항 경제성을 평가하기 위해 항해 거리와 선회에 의한 추진 에너지 손실량의 합을 평가 함수로 사용하고, 안전성을 평가하기 위해 별점 전략을 사용한다.

본 논문은 (3.3)과 같은 성능 평가 지수를 적합도 함수로 채택한다.

$$J = \sum_{i=1}^{n-1} |WP_{i+1} - WP_i| + 4 \times \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \delta^2 dt \quad (3.3)$$

여기서, WP_i 는 변침점 좌표, n 은 변침점의 수, δ 는 조타각, T_H 는 항해 시간을 나타낸다. (3.3)에서 첫 번째 항은 변침점 거리의 합이고, 두 번째 항은 변침에 의한 에너지 손실량을 나타낸다.

1) 별점 전략

안전성을 평가하기 위해 별점 전략을 사용한다. 항해 불가능한 영역으로 항로가 구성된 경우와 구성된 항로 주변에 항해 불가능 영역이 있는 경우 별점을 적합도 계산에 반영하여 최적 해를 찾도록 한다.

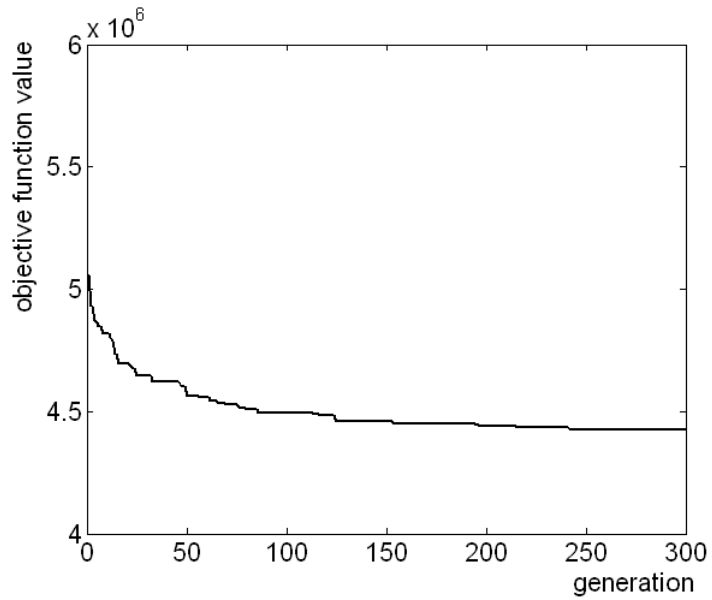
(4) 정지조건

집단이 모의진화를 거듭하면서 해 쪽으로 수렴해갈 때 언제 정지할 것인지를 결정하는 것은 대단히 중요하다. 두 가지 방법이 자주 이용된다. 하나는 현재의 세대 또는 반복횟수가 미리 지정된 값에 도달하면 정지하는 것이고, 다른 하나는 매 세대마다 염색체들의 유전자 수를 조사하여 수렴성을 조사하여 수렴된 유전자의 수가 총 유전자 수의 일정비율을 넘게 되면 탐색을 종료하거나 매 세대마다 얻어지는 잠정적인 해로부터 수렴성을 조사하여 종료하는 것이다. 본 논문은 반복 횟수가 미리 지정된 값에 도달하면 정지하도록 하였다.

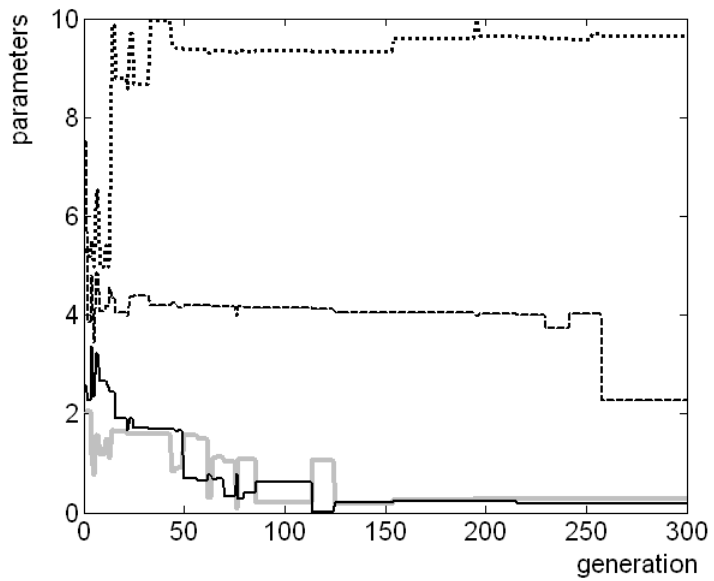
유전 알고리즘을 이용한 최적화는 집단 수 100, 세대수 300, 교배확률 95%, 돌연변이 확률 5%에 대하여 수행하였다. 그림 3.22는 유전알고리즘에서 세대별 목적함수 값과 파라미터의 변화를 나타낸 그림이다. 250세대 이후에 최적화되어 값이 변화가 없음을 볼 수가 있다.

최적화 초기의 항로는 그림 3.23과 같다. 그림 3.19에서 결정된 항로로부터 세선화 선분이 꺾이는 부분 4 곳과 방파제에 의해 해안선이 급격히 감소하는 1곳, 총 5개의 경계선이 선택되었다. 유전 알고리즘은 5개의 경계선의 한 점들로 구성되는 변침점 항로에 대하여 거리와 추진에너지 손실을 최소화하는 변침점 항로를 찾는다. 그림 3.24는 안전 수심 5[m]에 대하여 최적화한 항로이며, 3.25는 안전 수심 10[m]에서 최적화한 항로이다.

본 논문에서는 한 픽셀 크기를 33m로 고정하여 항로를 결정하였으나, 실제의 경우에는 다양하게 픽셀의 크기를 조정함으로써 항로 결정의 효율을 높일 수 있을 것이다. 예를 들어 원양항해의 경우 선체의 길이나 선체 길이의 수 배를 하나의 픽셀로 축소하여 연산할 수 있고, 연안 항해의 경우 선박의 선평을 하나의 픽셀로 축소하여 연산을 할 수 있을 것이다. 일반적으로 1만톤 선박의 경우 선평은 19.2m 길이는 160m 정도이고, 5만톤 선박의 경우 선평은 36m 길이는 300m 정도이다.



(a) objective function value



(b) parameters

그림 3.22 세대별 목적함수와 파라미터 변화

Fig. 3.22 An objective function value and parameters

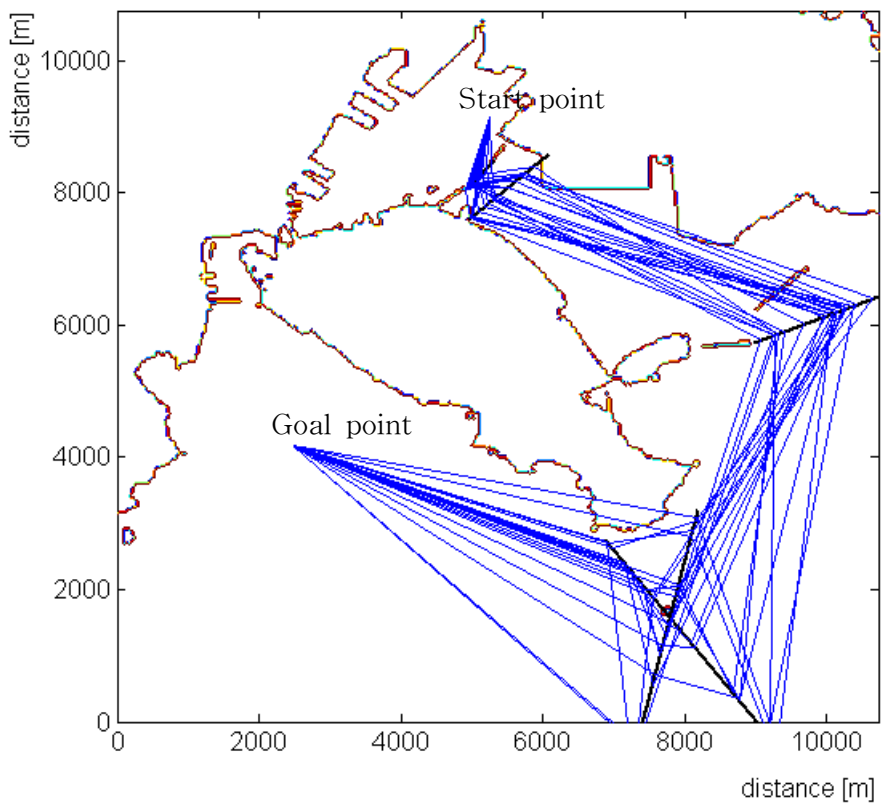


그림 3.23 초기 항로
 Fig. 3.23 Initial routes

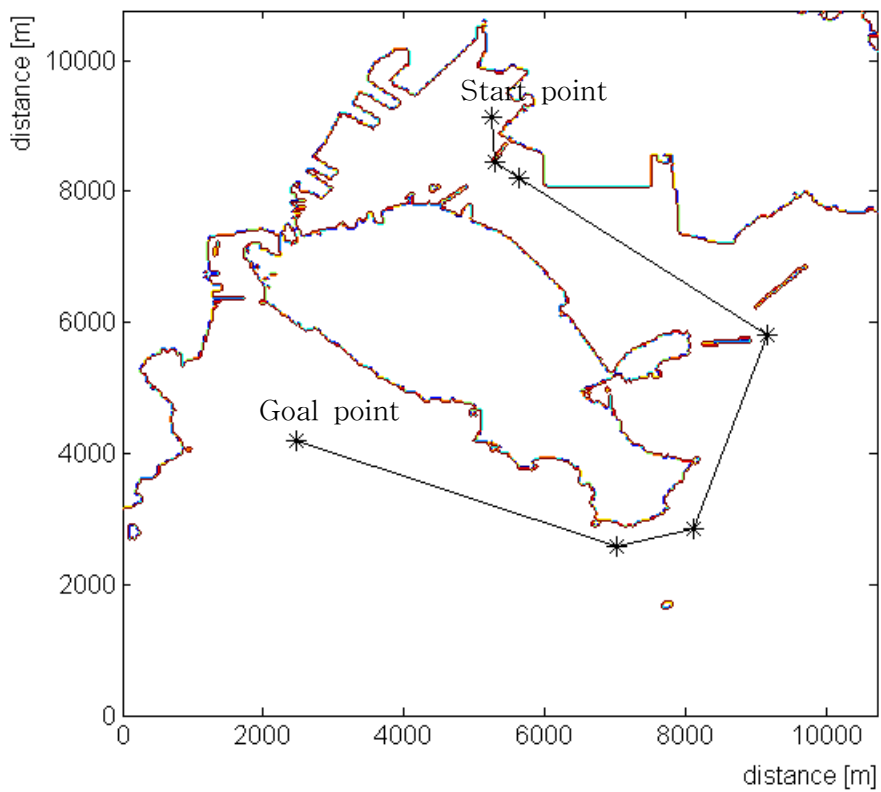


그림 3.24 최적 항로 (안전수심 5 [m])

Fig. 3.24 An optimal route (safe water depth : 5 [m])

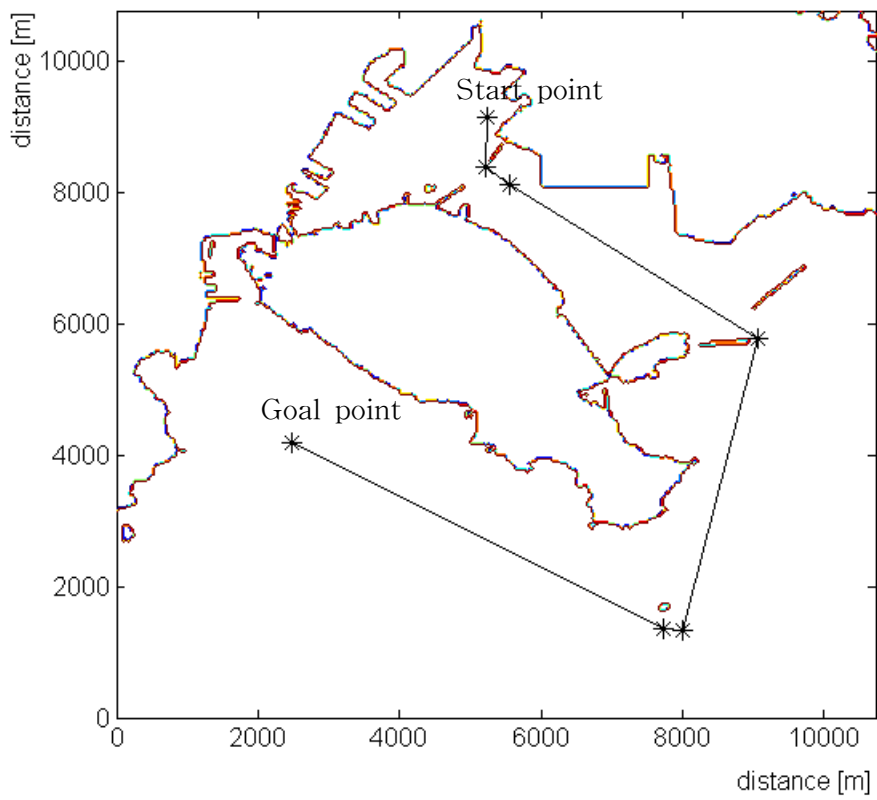


그림 3.24 최적 항로 (안전수심 10 [m])

Fig. 3.25 An optimal route (safe water depth : 10 [m])

제 4 장 LOS 가이드نس 시스템

본 장은 변침점 사이의 직선항로와 변침점 주변의 선회항로에 대한 LOS벡터를 각각 정의하고, 직선항로와 선회항로에 대한 LOS 가이드نس 규칙을 제안한다. 또한, 해류 중 항행하는 선박에 대해 유전 알고리즘을 이용하여 직선항로에 대한 LOS 가이드نس 시스템의 파라미터를 최적화하고, 제안한 LOS 가이드نس 시스템을 이용하여 선박의 항로 추종 시뮬레이션을 실시한다.

4.1 LOS 가이드نس 시스템

제어적인 측면에서 가이드نس 시스템은 선박이나 항공기 등의 항행 목적을 달성하기 위해 오토파일럿이라고 불리는 선박 및 항공기의 제어시스템 앞쪽에 위치하는 특별한 종류의 시스템 또는 계산 알고리즘이다. 선박의 가이드نس 시스템은 항로 제어, 항로 추종 문제를 다루기 위해 기준 항로를 생성하는 역할을 수행하며, 이를 위해 선박의 목표 위치, 속도, 회두각 등을 결정한다^[4]. 제어 시스템은 항행 동안 신뢰성 있는 가이드نس 규칙에 기초한 명령들을 수행하게 된다.

가이드نس 시스템은 크게 세 가지의 기능을 갖는다. 첫째는 항행 목적을 달성하기 위해 요구되는 선박의 속도, 회두각, 위치 등을 결정하는 것이고, 둘째는 운항의 안전성을 위해 선체를 안정화하거나 감속하는 것이고, 셋째는 선체 주위의 파도, 바람, 해류 등의 외란 입력에 대한 선박의 민감도를 감소시키는 것이다^[4].

선박의 항로 추종을 위한 LOS 가이드نس 시스템을 포함하는 INS 시스템의 구성도는 그림 4.1과 같다. LOS 가이드نس 시스템은 GPS의 위치 정보를 컴퓨터나 항해사에 의해 결정된 변침점 정보와 비교하여 직선항로와 선회항로에 따라 선박의 목표속도와 목표 회두각을 결정한다. 선박이 회두

각 유지를 위한 오토파일럿 시스템과 선박의 위치를 알 수 있는 GPS 시스템을 장착하고 있다면, 제안하는 LOS 가이드 시스템이 생성하는 회두각 명령에 따라 오토파일럿 시스템이 회두각 유지 제어를 수행함으로써 선박이 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능하다^[68,69].

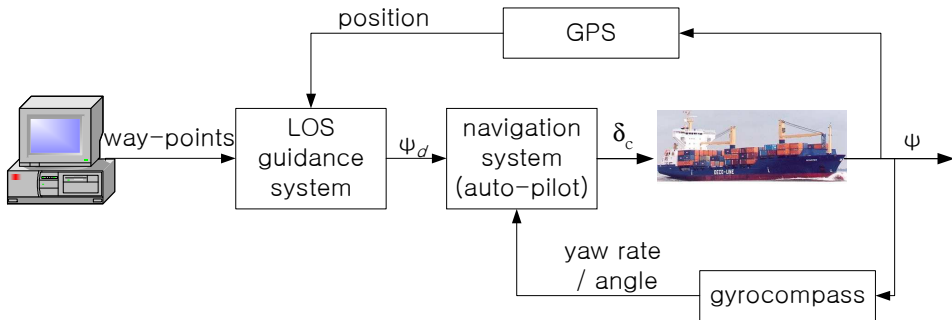


그림 4.1 INS 시스템의 개요

Fig. 4.1 A blockdiagram of an INS system

4.2 LOS 가이드 시스템 규칙

본 절은 직선항로와 선회항로에 대해 LOS 벡터를 정의하고, 각각의 가이드 시스템 규칙을 유도한다.

4.2.1 직선항로 LOS 가이드 시스템 규칙

가이드 시스템의 LOS 벡터는 선체 고정좌표계 원점에서 다음 변침점 좌표까지의 벡터나 변침점 사이의 한 점까지의 벡터로 정의된다. 본 논문은 직선항로에 대해 그림 4.2와 같이 변침점 사이의 LOS점까지의 벡터를 LOS 벡터로 사용한다. 현재 선박위치에 대한 변침점 사이의 직선항로의 목표위치 $P_d(x_d, y_d)$ 는 다음과 같다^[24,70].

$$x_d = x_2 + t_k(x_3 - x_2) \quad (4.1a)$$

$$y_d = y_2 + t_k(y_3 - y_2) \quad (4.1b)$$

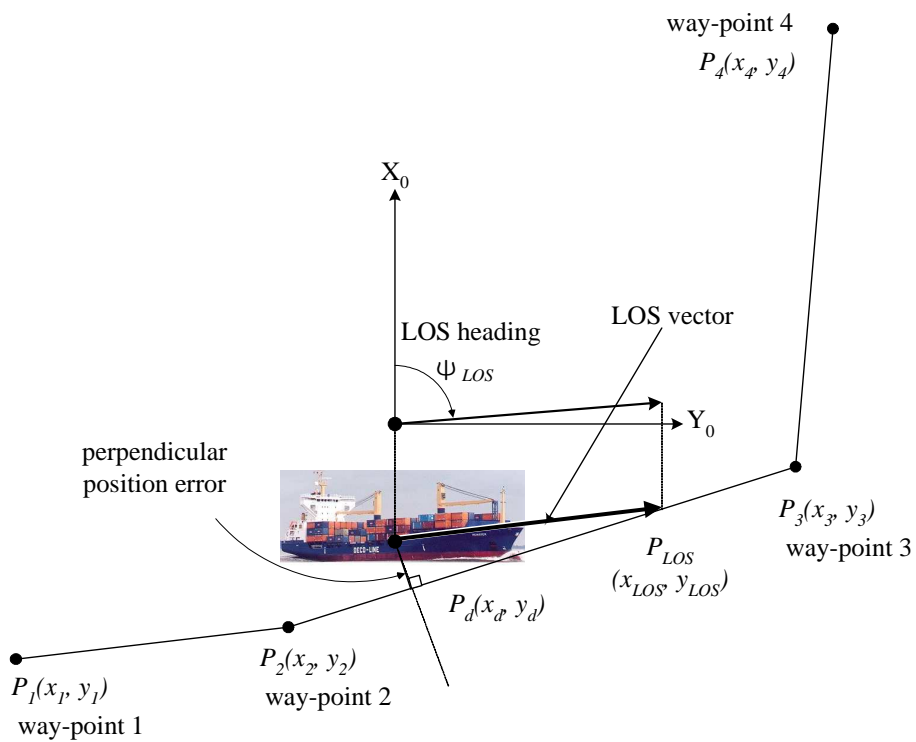


그림 4.2 직선항로에 대한 LOS벡터의 정의

Fig. 4.2 Definition of a LOS vector for a straight line

여기서,

$$t_h = \frac{(x_3 - x_2)(x - x_2) + (y_3 - y_2)(y - y_2)}{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} \quad (4.2)$$

이다.

선박의 현재 위치에서 변침점 사이의 직선항로의 대응하는 위치에 대한 수직 위치오차의 크기는 (4.3)과 같다^[24,25].

$$|P_e| = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2} \quad (4.3)$$

변침점 2에서 3으로의 회두각은 (4.4)와 같다.

$$\Psi_{\text{WP23}} = \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) \quad (4.4)$$

여기서, $\text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) := \tan^{-1}\left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}\right)$ 로 2변수 역탄젠트 함수이다.

선박에서 변침점 3으로의 회두각은 (4.5)와 같고,

$$\Psi_{\text{WP3}} = \text{atan2}(y_3 - y, x_3 - x) \quad (4.5)$$

선박의 현 위치에서 LOS점으로의 회두각은 (4.6)과 같다.

$$\Psi_{\text{LOS}} = \text{atan2}(y_{\text{LOS}} - y, x_{\text{LOS}} - x) \quad (4.6a)$$

$$x_{\text{LOS}} = x_d + L \cdot \cos \Psi_{\text{WP23}} \quad (4.6b)$$

$$y_{\text{LOS}} = y_d + L \cdot \sin \Psi_{\text{WP23}} \quad (4.6c)$$

여기서, L 은 선박의 현재 위치에 대응하는 직선항로상의 목표위치 P_d 로부터 LOS점까지의 거리, 즉 LOS벡터의 변침점 2에서 3으로의 직선항로 성분을 나타낸다.

직선항로 LOS 가이드선 규칙을 수직 위치오차 P_e 와 직선항로의 목표 위치로부터 LOS점까지의 거리 L 에 대한 함수로 유도하기 위해 그림 4.2를 자세하게 나타내면 그림 4.3과 같다.

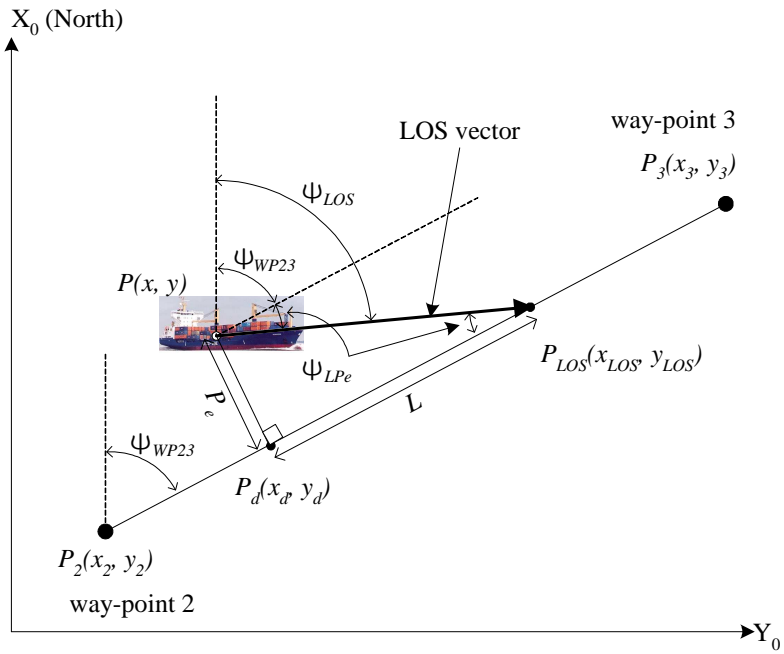


그림 4.3 직선 항로에 대한 LOS 가이드스

Fig. 4.3 LOS guidance for a straight line

변침점 2와 3 사이의 직선향로와 LOS벡터의 만남각은 L 과 P_e 에 대해 (4.7)과 같이 표현된다.

$$\tan(\Psi_{LP_e}) = \text{sgn}(P_e) \frac{|P_e|}{L} \quad (4.7)$$

여기서,

$$\text{sgn}(P_e) = \text{sgn}((x_d - x)(y_{LOS} - y_d) - (x_{LOS} - x_d)(y_d - y)) \quad (4.8)$$

이고, 선박이 직선향로에 대해 좌측에 위치하는지 우측에 위치하는지 판별하기 위해 사용된다. 양이면 선박은 직선향로의 좌측에 위치하고, 음이면 직선향로의 우측에 위치한다.

수직 위치오차 P_e 와 선박의 목표위치에서 LOS점까지의 거리 L 에 대하여 LOS 가이드선 규칙을 (4.9), (4.10)과 같이 제안한다.

$$\Psi_d = \Psi_{WP3} + \Psi_{LP_e} \quad (4.9)$$

$$\Psi_{LP_e} = \text{atan}\left(-\text{sgn}(P_e) \frac{K_1 \cdot |P_e|}{L}\right) \quad (4.10)$$

여기서,

$$L = K_2 u \quad (4.11)$$

이다.

제안된 가이드선 규칙에서 K_1 은 수직 위치오차에 대한 이득을 나타내고, K_2 는 전진방향 속도에 대한 이득으로 선박의 현재 위치의 직선향로상의 대응하는 목표위치로부터 LOS점까지의 거리를 결정하기 위해 사용되는 파라미터이다. (4.10)은 수직 위치 오차에 대한 보상 능력을 강화할 수 있게 하고, (4.11)은 선박의 전진방향 속도에 대해 적절한 보상을 가능하게 한다.

4.2.2 선회항로 LOS 가이드نس 규칙

선회항로에 대한 LOS 가이드نس 시스템에서 사용되는 각 중 변수는 그림 4.4와 같다^[6].

변침점 1,2 구간과 변침점 2,3 구간의 회두각은 각각 (4.12)와 같고,

$$\Psi_{w\beta 12} = \arctan 2(y_2 - y_1, x_2 - x_1) \quad (4.12a)$$

$$\Psi_{w\beta 23} = \arctan 2(y_3 - y_2, x_3 - x_2) \quad (4.12b)$$

$\Psi_{w\beta 12}$ 에서 $\Psi_{w\beta 23}$ 로의 변침각은 (4.13)과 같다.

$$\Psi_{w\beta 123} = \Psi_{w\beta 23} - \Psi_{w\beta 12} \quad (4.13)$$

선회원의 중심에서 변침점 2에서 변침점 3으로의 각 α 는 (4.14)와 같다.

$$\begin{aligned} 2\alpha &= \pi - |\Psi_{w\beta 123}| = \pi - |\Psi_{w\beta 23} - \Psi_{w\beta 12}| \\ \alpha &= 0.5 \times (\pi - |\Psi_{w\beta 23} - \Psi_{w\beta 12}|) \\ &= \pi/2 - 0.5 |\Psi_{w\beta 23} - \Psi_{w\beta 12}| \end{aligned} \quad (4.14)$$

또한 $\tan \alpha = \frac{R}{d}$ 이므로,

$$d = \frac{R}{\tan \alpha} = \frac{R}{\tan(\pi/2 - 0.5 |\Psi_{w\beta 12} - \Psi_{w\beta 23}|)} \quad (4.15)$$

이 된다.

선회 원과 직선항로가 접하는 좌표는

$$x_{in} = x_2 - d \cos \Psi_{w\beta 12} \quad (4.16a)$$

$$y_{in} = y_2 - d \sin \Psi_{w\beta 12} \quad (4.16b)$$

과

$$x_{out} = x_2 + d \cos \Psi_{w\beta 23} \quad (4.17a)$$

$$y_{out} = y_2 + d \sin \Psi_{w\beta 23} \quad (4.17b)$$

이 된다.

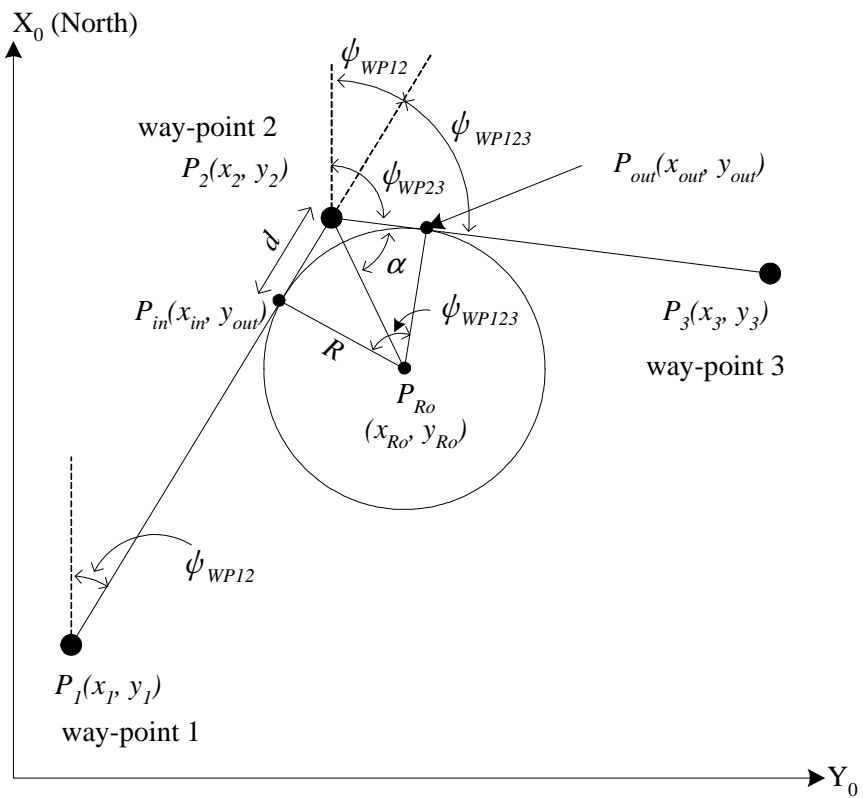


그림 4.4 선회항로에 사용되는 변수

Fig. 4.4. Definition of turning variables

또한, d 를 이용하여 선회 원의 중심 좌표를 구하면

$$\begin{aligned} x_{Ro} &= x_{in} + d \cos \Psi_{w\beta 23} \\ &= x_2 - d \cos \Psi_{w\beta 12} + d \cos \Psi_{w\beta 23} \\ &= x_2 + d (\cos \Psi_{w\beta 23} - \cos \Psi_{w\beta 12}) \end{aligned} \quad (4.18a)$$

$$\begin{aligned} y_{Ro} &= y_{in} + d \cos \Psi_{w\beta 23} \\ &= y_2 - d \cos \Psi_{w\beta 12} + d \cos \Psi_{w\beta 23} \\ &= y_2 + d (\cos \Psi_{w\beta 23} - \cos \Psi_{w\beta 12}) \end{aligned} \quad (4.18b)$$

이 된다.

선회 중심에서 선회 항로와 직선 항로의 접점에서의 각도는

$$\Psi_{Ro in} = \text{atan2}(y_{in} - y_{Ro}, x_{in} - x_{Ro}) \quad (4.19a)$$

$$\Psi_{Ro out} = \text{atan2}(y_{out} - y_{Ro}, x_{out} - x_{Ro}) \quad (4.19b)$$

이 된다.

이 때, 선박의 회두각이 $\Psi_{w\beta 12}$ 에서 $\Psi_{w\beta 23}$ 로 변침하는 동안 선박 중심에 대해 선박은 $\Psi_{Ro in}$ 에서 $\Psi_{Ro out}$ 으로 회전한다. 즉,

$$\Psi_{w\beta 23} = \Psi_{w\beta 23} - \Psi_{w\beta 12} = \Psi_{Ro out} - \Psi_{Ro in} \quad (4.20)$$

이 된다.

선박의 선회 각속도, 선회 반경, 선박의 전체 선속도의 관계를 설명하기 위해 스텝조타 시 일반적인 선회 궤적을 나타내면 그림 4.5와 같다^[5,6].

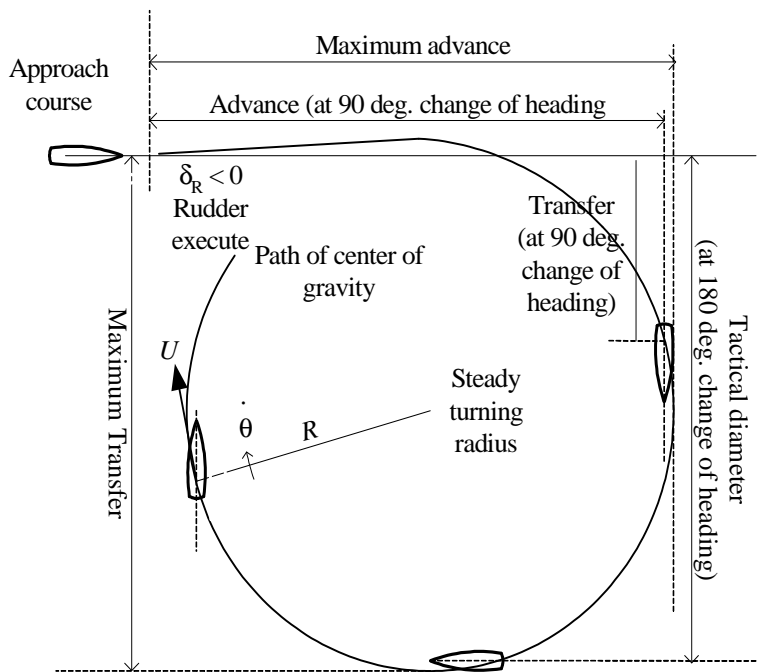


그림 4.5. 스텝 조타시 선회 궤적

Fig. 4.5 Turning circle for a constant rudder angle

선회시 선박의 선속도는 기하학적 관계에서

$$U = R \cdot \dot{\theta} \quad (4.21)$$

이 된다.

(4.21)로부터 선회반경과 선회 각속도는

$$R = \frac{U}{\dot{\theta}} \quad (4.22)$$

$$\dot{\theta} = \frac{U}{R} \quad (4.23)$$

이다.

선회항로에서 LOS 가이드 시스템이 사용하는 LOS 벡터는 그림 4.6과 같이 선회원의 LOS점으로부터 접선벡터로 정의한다.

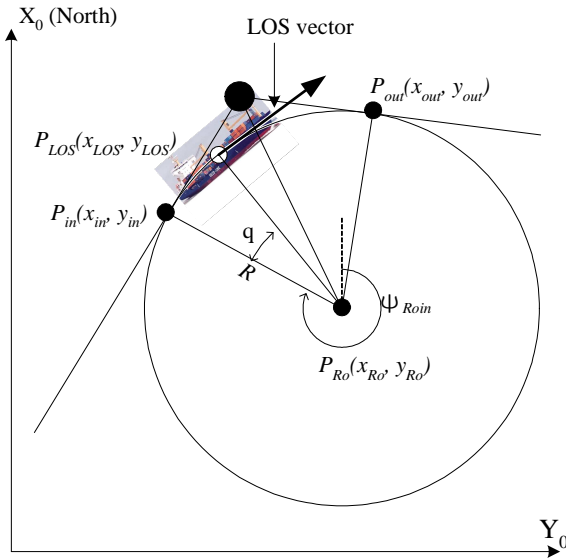


그림 4.6 선회항로에 대한 LOS 벡터

Fig. 4.6 An LOS vector for turning circle

선회항로에서 LOS점은

$$x_{LOS} = x_{Ro} + R \times \cos(\psi_{Ro in} + \Theta) \quad (4.24a)$$

$$y_{LOS} = y_{Ro} + R \times \sin(\psi_{Ro in} + \Theta) \quad (4.24b)$$

이다. 여기서 Θ 는 (4.25)와 같이 정의된다.

$$\Theta = \int_{T_0}^T \dot{\Theta} dt = \int_{T_0}^T \frac{U}{R} dt = \frac{U}{R} (T - T_0) \quad (4.25)$$

Θ 는 선회 시작 후 $T - T_0$ 시간 동안 선회한 각도를 나타낸다. 선회 구간에서 선회 반경과 선회시 선박의 목표 속도를 결정함으로써 LOS점을 결정할 수 있다. P_{in} 의 접선벡터에서 P_{LOS} 의 접선벡터로의 각 변화는 회전 중심에 대한 회전각 Θ 와 동일하다. 그러므로 선회 항로에 대한 LOS 가이드선스 규칙을 (4.26)과 같이 제안한다.

$$\psi_d = \psi_{wp2} + \Theta \quad (4.26)$$

지금까지 직선허로와 선회항로에 대한 LOS가이드선스 규칙을 제안하였다. 직선허로와 선회항로에서 LOS벡터를 정의하기 위해 사용된 LOS점은 선박이 추종해야 할 목표 위치를 선행하도록 설계되었다. (4.9), (4.10)의 직선허로 LOS 가이드선스 규칙은 선속도와 위치오차에 대한 함수로 유도되어 선박의 속도와 위치오차에 따라 적절한 가이드선스 명령을 내리도록 설계되었고, 선회항로 LOS 가이드선스 규칙은 선회 각속도에 대한 함수로 유도되어 목표하는 선회 각속도에 따라 가이드선스 명령을 내릴 수 있게 설계되었다.

4.3 직선항로 LOS 가이드 시스템의 최적화

선박의 항로는 선회를 하거나 긴급상황에서 충돌이나 장애물 회피를 하는 경우를 제외하고 대부분 직선항로로 구성된다. 직선항로에서 선박은 자이로컴파스의 신호를 적분하여 얻는 회두각을 일정하게 유지하는 제어가 이루어지는데 이를 회두각 유지제어 또는 오토파일럿이라 부른다. 선박이 해류와 같은 외란이 존재하는 바다를 항해하는 경우, 오토파일럿을 통한 회두각 유지제어만으로 해류에 의한 위치 오차를 줄일 수 없어 정해진 항로를 정확하게 추종할 수 없게 된다. 선박이 미리 정해진 항로를 추종하기 위해서는 위치오차를 적절하게 보상해줄 수 있는 가이드 시스템이 요구되어진다. 이때 위치 오차를 줄이기 위한 가이드 시스템의 유도 명령은 선박의 운항환경을 고려하여 적절하게 생성되어야 한다. 대양항해시에는 정해진 항로를 엄격하게 추종하는 것보다 추진 에너지 손실을 최소화하도록 유도 명령이 생성되어야 하고, 연안항해시에 안전을 고려하여 정확한 항로 추종이 되도록 유도 명령이 생성되어야 한다. 이를 위해 본 절은 각각의 경우에 대하여 유전알고리즘을 이용하여 가이드 시스템의 파라미터를 최적화한다.

4.3.1 해류 중 항행하는 선박의 모델링

(1) 선박의 수학모델

Nomoto 2차 모델에 기초하여 해류 중 항행하는 선박의 수학모델을 유도한다. 앞에서 기술한 Nomoto 2차 모델을 다시 쓰면 (4.27)과 같다.

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (4.27)$$

그림 4.7에서 직선항로 항해시 선박의 운동학적 관계는 다음과 같다.

$$\dot{x} = u \cos \Psi - v \sin \Psi \quad (4.28a)$$

$$\dot{y} = u \sin \Psi + v \cos \Psi \quad (4.28b)$$

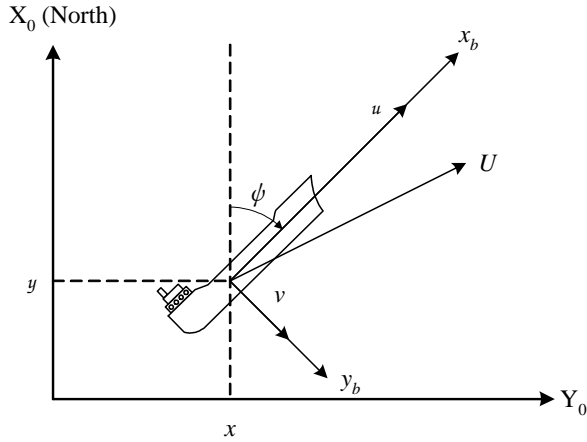


그림 4.7 선박의 좌표계와 운동 변수

Fig. 4.7 The coordinate systems and motion variables for a marine vessel

직선항로 향해서 전진방향 속도 $u \gg 0$ 이고, 횡방향 속도 $v \approx 0$ 이므로 $U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u$ 가 되고, (4.27)과 (4.28)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\psi} = r \tag{4.29a}$$

$$\dot{r} = ar + \beta \tag{4.29b}$$

$$\dot{x} = U \cos \Psi = u \cos \Psi \tag{4.29c}$$

$$\dot{y} = U \sin \Psi = u \sin \Psi \tag{4.29d}$$

여기서, $a = -1/T$ 이고, $b = K/T$ 이다.

(2) 2차원 해류모델

고정 절대좌표계에서 2차원 해류는 평균 해류속도 V_c 와 해류방향 β 에 대해 그림 4.8과 같이 표현된다^[5,6]. 고정 절대좌표계에서 수상 선박에 대한 2차원 해류 속도는 다음과 같다.

$$u_c^E = V_c \cos \beta \tag{4.30a}$$

$$v_c^E = V_c \sin \beta \tag{4.30b}$$

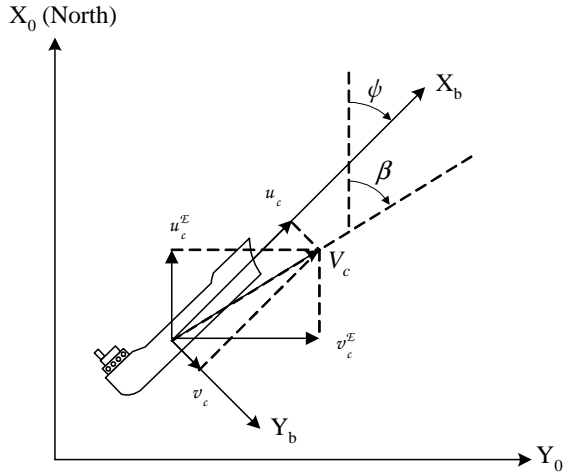


그림 4.8 선박에 대한 해류의 평균속도 V_c 와 해류방향 β 의 정의
 Fig. 4.8 Definition of average velocity V_c and direction β of the current for a surface vessel

해류의 속도방정식을 원점이 선박의 무게중심에 고정된 이동좌표계에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi \\ -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^x \\ v_c^x \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

(4.29)를 (4.30)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$u_c = V_c \cos(\beta - \Psi) \quad (4.32a)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta - \Psi) \quad (4.32b)$$

(3) 선박모델과 해류모델의 결합

2차원 해류모델 (4.31)과 선박 모델 (4.28)을 결합하면 다음과 같다.

$$\dot{\Psi} = r \quad (4.33a)$$

$$\dot{r} = ar + \beta \quad (4.33b)$$

$$\dot{x} = u \cos \Psi + u_c = u \cos \Psi + V_c \cos(\beta - \Psi) \quad (4.33c)$$

$$\dot{y} = u \sin \Psi + v_c = u \sin \Psi + V_c \sin(\beta - \Psi) \quad (4.33d)$$

4.3.2 유전 알고리즘을 이용한 최적화

제안한 가이던스 시스템의 파라미터를 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여 최적화한다. 선박의 대양항해와 연안항해를 구분하여 운항 경제성과 선박의 안전성을 위해 수직오차를 고려하여 최적 파라미터를 결정한다.

(1) 적합도 평가

본 절의 최적화 목적은 대양항해시 운항 경제성을 최대화하는 것이고, 연안항해시 운항경제성과 함께 수직 위치오차를 최적화하는 것이다. 이를 위해 적합도 함수는 운항경제성을 평가하기 위해 추진에너지 손실량 평가 지수를 사용하고, 수직 위치오차에 대해 벌점전략을 사용한다.

자동조타에 의한 추진에너지 손실량 평가법에 관해서 Nomoto는 추진 에너지 손실을 조타저항과 선회 원심력저항에 의해 평가하였고^[71], Koyama는 항로 연장과 조타 저항에 의해 평가하였으며^[72], Hasegawa는 항로연장, 조타저항, 선회 원심력저항에 의해 평가하였다^[73]. 본 논문은 선형에 관계없이 계수를 구한 Koyama의 성능 평가지수를 사용한다. Koyama의 성능 평가지수는 다음과 같다.

$$J = \frac{1}{2} \overline{\Psi_e^2} + 4 \overline{\delta^2} \quad (4.34)$$

여기서,

$$\Psi_e = \Psi_{WP23} - \Psi_d \quad (4.35a)$$

$$\overline{\Psi_e^2} = \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \Psi_e^2 dt \quad (4.35b)$$

$$\overline{\delta^2} = \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \delta^2 dt \quad (4.35c)$$

이다. 성능평가지수의 우변 제 1항은 항로 증가에 따른 에너지 손실량을 나타내고, 제 2항은 조타에 의한 타직압력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다.

4.3.3 해류 중 직선항로 LOS 가이드نس 시뮬레이션

제안한 LOS 가이드نس 시스템의 파라미터를 유전 알고리즘을 이용하여 최적화하였다. 최적화는 횡과 평균 해류속도 0.75 m/s의 조건 하에서 집단수 50, 세대수 50, 교배확률 90%, 돌연변이 확률 2%에 대하여 수행하였다. 대양항해시 선박의 위치오차는 선박의 안전성에 큰 영향을 미치지 못하므로 운항 경제성에 중심을 두고 (4.34)의 적합도 함수를 최적화하였다. 연안 항해시 선박의 운항 경제성 뿐만 아니라 안전성을 위해 위치오차를 고려하여 위치오차가 10m를 벗어나는 경우 벌점을 부여하는 벌점 전략을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 선박제원은 표 4.1과 같고, 회두각 유지 제어기는 (4.36)과 같은 PD제어기를 사용하였다. 제어기의 파라미터는 $k_p=1.5$, $k_d=100$ 을 사용하였다.

$$\delta_c = k_p \Psi_e + k_d \dot{\Psi}_e \quad (4.36)$$

표 4.1 카고쉽 제원

Table 4.1 Specification of a cargo ship (mariner class)

Parameter	Value
L (m)	161.0
u (m/s)	7.7
∇ (dwt)	16622.0
K (1/s)	0.185
T_1 (s)	118.0
T_2 (s)	7.8
T_3 (s)	18.5

(1) 연안항해 시뮬레이션

연안항해시 유전 알고리즘을 통해 구한 직선향로 가이드스 시스템의 파라미터 최적값은 $K_1 = 14$, $K_2 = 54$ 이다. 최적화한 가이드스 시스템의 성능을 확인하기 위해 선체길이의 1.5배 위치의 LOS점을 목표로 하는 LOS 가이드스 시스템과 다음 변침점을 목표로 하는 LOS 가이드스 시스템에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 그림 4.9와 같다.

선체 길이의 1.5배의 위치를 목표로 하는 LOS 가이드스 시스템의 경우 25m 정도의 위치 오차를 갖고 운항되지만, 제안한 가이드스 시스템은 선박 운항의 안전 제한 조건인 10m 안에서 운항되도록 가이드스하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 위해 제어입력이 지속적으로 인가되고 있다.

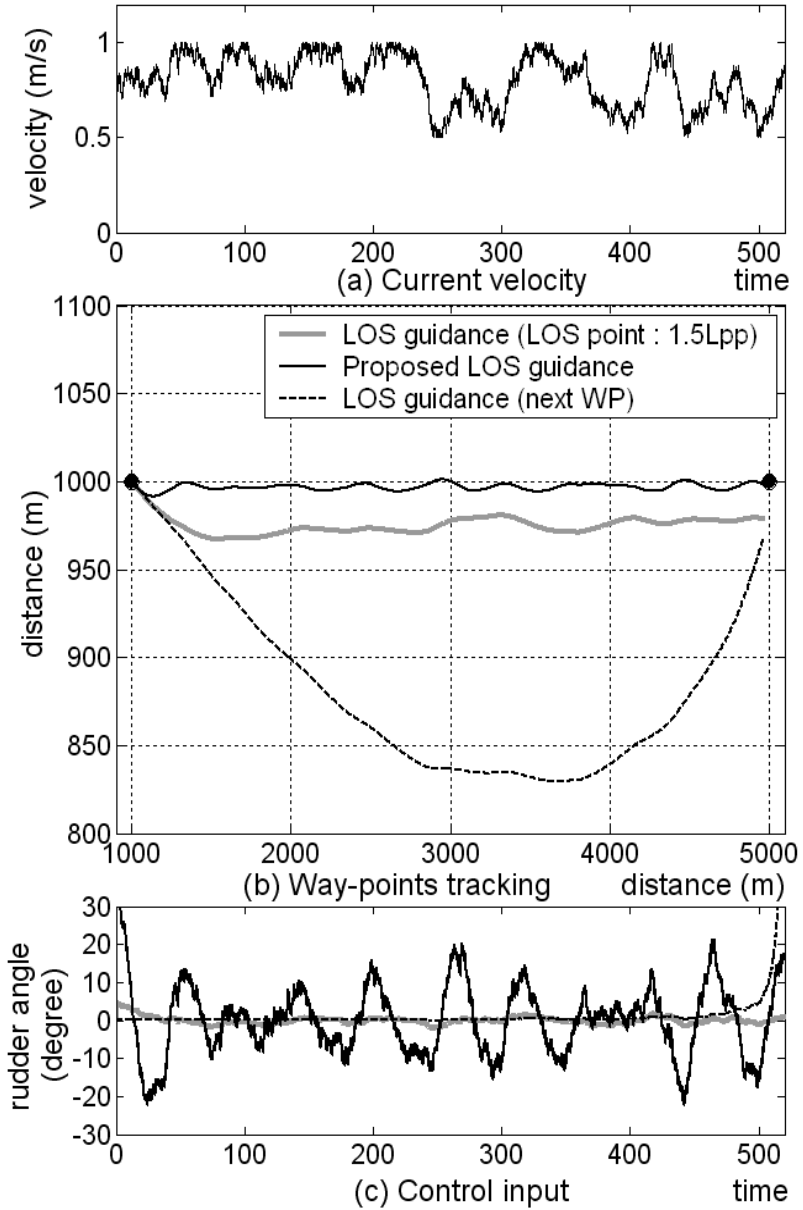


그림 4.9 연안 직선항로 LOS 가이드 시스템 시뮬레이션
 Fig. 4.9 Simulation of LOS guidance system in the near sea

(2) 원양항해 시뮬레이션

원양항해시 유전알고리즘을 통해 최적화된 직선항로 LOS 가이드نس 시스템의 파라미터 최적값은 $K_1 = 1$, $K_2 = 72$ 이다. 최적화된 가이드نس 시스템의 성능을 확인하기 위해 연안항해와 동일한 모델에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 그림 4.10과 같다.

제안한 가이드نس 시스템은 선체 길이의 1.5배의 위치를 목표로 하는 LOS 가이드نس 시스템에 비해 위치오차가 크지만 조타 변화가 적어 추진 에너지 손실량이 적게 운항되도록 가이드نس하고 있음을 확인할 수 있다.

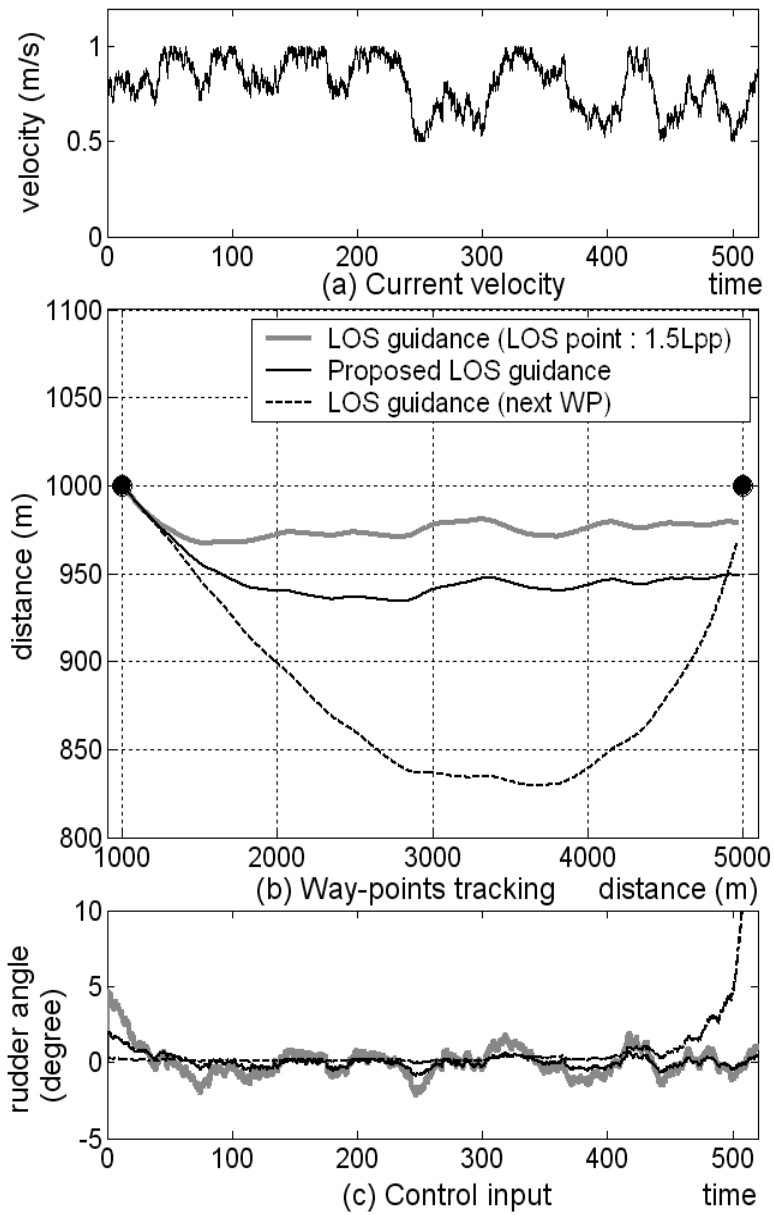


그림 4.10 원양항해 직선항로 LOS 가이드 시스템 시뮬레이션
 Fig. 4.10 Simulation of LOS guidance system in the deep sea

4.4 항로 추종 시뮬레이션

제안한 LOS 가이드스 시스템의 성능을 고찰하기 위해 간단한 Nomoto 2차 모델을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용한 모델은 (4.37)과 같고, 조타기는 (2.60)과 같은 1차 모델을 사용하였다.

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (4.37)$$

회두각 유지 제어기는 (4.38)과 같은 PD제어기를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 선박 제원은 4.3절의 표 4.1과 같고, 오토파일럿은 (4.38)과 같은 PD제어기를 사용하였다. 오토파일럿의 제어기 파라미터는 $k_p = 1.5$, $k_d = 100$ 을 사용하였다.

$$\delta_c = k_p \psi_e + k_d \dot{\psi}_e \quad (4.38)$$

시뮬레이션 결과는 그림 4.11과 같다. 그림 4.11(a)는 제안한 가이드스 시스템의 명령에 따라 선박이 제어되어 항로 추종이 되고 있음을 보여주고 있다. 그림 4.11(b)는 항로 추종 동안 생성된 LOS 가이드스 명령과 선박의 회두각을 나타내고, 그림 4.11(c)는 항행 동안의 조타각을 나타낸 것이다. 그림 4.11(b)를 살펴보면, 직선항로에서는 직선항로를 유지하기 위한 가이드스 명령을 생성하고, 선회항로에서는 변침 초기에 가이드스 명령을 크게 인가하여 응답속도가 느린 선박이 정확한 선회동작을 수행하도록 빠른 조타명령을 유도하고 있다. 이를 통해 선박이 정해진 항로를 추종하면서 직선항로와 선회항로에서 조타 변화가 작게 발생하도록 하고 있다. 작은 조타 변화는 잦은 조타로 인한 추진 에너지의 손실량을 감소시키는 기능을 하여 선박의 운항경제성 측면에서 LOS 가이드스 시스템의 또 다른 장점이 된다.

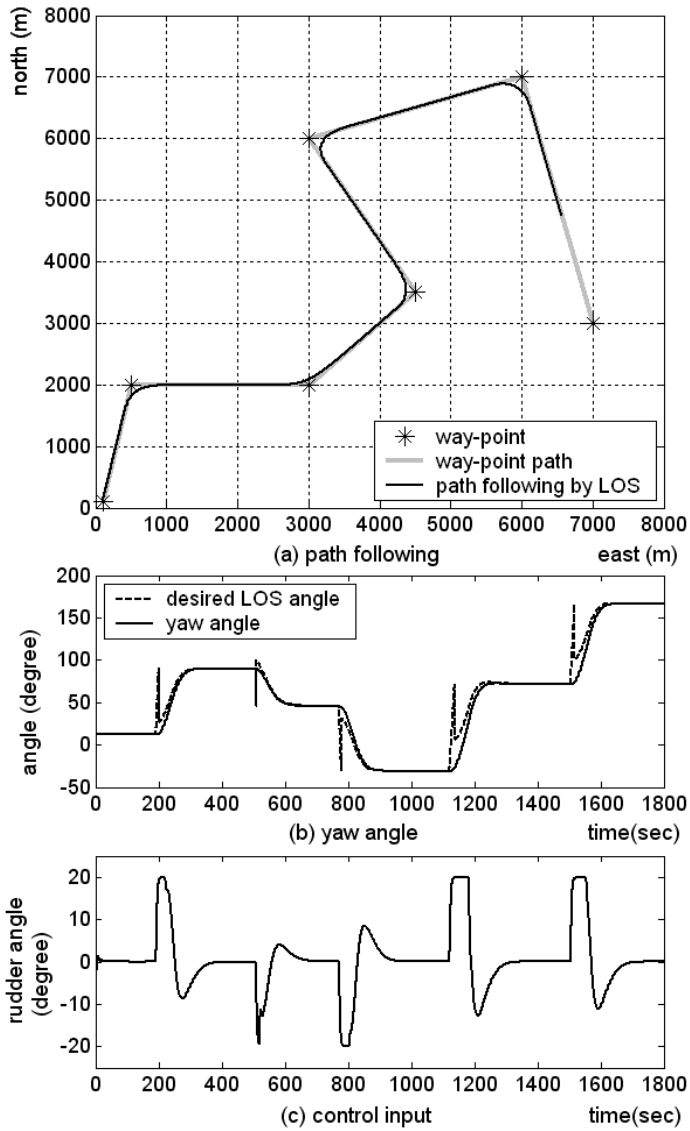


그림 4.11 선박의 항로 추종 시뮬레이션 결과
 Fig. 4.11 Simulation result for path following

시뮬레이션 결과는 선박이 회두각 유지를 위한 오토파일럿 시스템과 선박의 위치를 알 수 있는 GPS 시스템을 장착하고 있다면, 제안된 가이드스 시스템이 생성하는 회두각 명령에 따라 오토파일럿 시스템이 회두각 유지 제어를 수행함으로써 선박이 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능함을 보여준다. 가이드스 명령 동안 선박의 긴급 사태에 대비하기 위해 조타기 명령각을 $\pm 20^\circ$ 로 제한하였다.

제 5 장 시뮬레이션 및 고찰

본 장은 비선형 퍼지 PID제어기를 이용하여 오토파일럿 시스템을 구축하고 3차원 비선형 선박모델을 대상으로 다양한 변침각에 대한 변침능력을 시뮬레이션하고, 직선항로와 선회항로에 대해 제안된 LOS 가이드런스 시스템을 이용하여 3차원 비선형 선박모델에 대한 항로추종 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 고찰한다.

5.1 오토파일럿 시스템

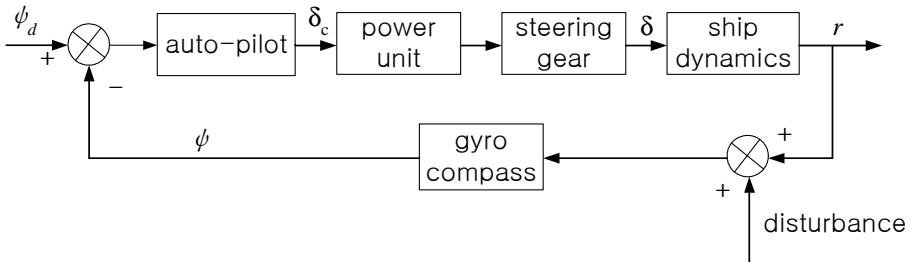


그림 5.1 오토파일럿 시스템의 블록 다이어그램

Fig. 5.1 The block diagram of an autopilot system

1922년 Sperry와 Minosky는 오토파일럿 시스템을 자이로에 의해 측정된 회두각을 궤환하는 단일 입·출력 제어시스템으로 구현하였다^[1,2]. 현대의 오토파일럿 시스템에서 궤환 신호는 오토파일럿을 소프트웨어로 구현하는 컴퓨터에 입력된다. 오토파일럿 시스템은 측정된 회두각과 목표 회두각을 비교하여 조타 명령을 계산하고 조타기를 제어한다. 현대의 오토파일럿 시스템은 Sperry와 Minosky의 오토파일럿 시스템과 비슷한 구조를 갖지만 복잡하고 다양한 기능을 포함한다^[74~77]. 오토파일럿 시스템은 천해 효과(shallow water effect)와 같이 파라미터가 변화되는 환경 조건

에 대한 적응성을 가져야하고, 정확하고 빠른 변침 능력을 가져야하며, 회두각속도의 가속, 일정한 회두각속도, 회두각속도 감속의 과정을 통해 큰 회두각 변화에 대한 오버슈트를 회피하는 기능을 포함해야 한다^[3].

대부분의 선박에서 오토파일럿 시스템으로 구조가 간단하여 적용이 쉽고, 제어 성능이 우수하며 제어이득 조정이 비교적 쉬운 PD제어기를 사용한다. PD제어기는 제어시스템의 응답 속도 개선, 안정화, 오버슈트 등에 대한 조정 능력을 갖고 전체 피드백 시스템에 대한 안정도와 높은 민감도를 제공하지만, 정상상태 오차가 존재하고 천해효과와 같은 비선형성이 강한 경우 성능에 한계를 갖는다.

본 절은 PD형 오토파일럿 시스템의 단점을 극복하고, 현대의 오토파일럿 시스템이 갖추어야할 다양한 기능을 제공할 수 있는 비선형 퍼지 PID 제어기형 오토파일럿 시스템을 구축한다.

비선형 퍼지 PID제어기는 퍼지화기, 제어규칙 베이스, 비퍼지화기로 구성되고 일반적인 퍼지제어기의 설계과정에 따라 유도된다. 유도된 퍼지 PID제어기는 일반적인 PID제어기의 이산시간 퍼지형 제어기가 되고, 선형 PID제어기와 동일한 제어기 구조를 갖지만 제어기의 계인은 고정되지 않고 입력신호에 대한 비선형 함수형태가 된다^[78~80]. 그러므로 퍼지 PID 제어기는 단순한 선형구조를 갖는 일반적인 선형 PID제어기에 비해 향상된 비선형 보상 능력과 자기동조 능력을 갖는다. 이러한 비선형 보상 능력과 자기 동조 능력은 현대의 오토파일럿 시스템이 갖추어야할 변화하는 환경에 대한 적응성을 갖게 하고, 정확하고 빠른 변침 능력을 갖게 한다. 또한, 비선형 퍼지 PID제어기의 퍼지 분할 변수에 의해 제어기 출력이 제한됨으로써 회두각 변화가 큰 경우에도 큰 오버슈트 없이 일정한 회두각 속도를 갖고 선회하도록 제어하는 것이 가능하다.

5.1.1 비선형 퍼지 PID제어기

비선형 퍼지 PID제어기는 퍼지논리에 기본을 둔 퍼지 논리제어기(Fuzzy Logic Controller; FLC)로 구성된다. FLC는 숙련자의 경험과 제어 전문가의 지식을 규칙 베이스 또는 데이터 베이스 형태로 가지게 되며, 제어기는 규칙베이스를 활용하여 시스템의 동작상태에 따라 제어량을 판단 결정하는 기능을 가진다. 그림 5.2는 FLC로 구성된 비선형 퍼지 PID 오토파일럿 시스템의 구성도이다^[78~80]. FLC는 회두각 오차, 오차의 속도 성분, 오차의 가속도 성분을 입력으로 사용하고, 퍼지 제어규칙과 비퍼지 화기를 각각 포함하는 서로 다른 두 개의 퍼지 제어 블록으로 구성된다.

$$\Psi_e(nT) = \Psi_d(nT) - \Psi(nT) \quad (5.1)$$

$$\Psi_{e*} = GE \times \Psi_e(nT) \quad (5.2)$$

$$\Psi_r(nT) = [\Psi_e(nT) - \Psi_e(nT - T)] / T \quad (5.3)$$

$$\Psi_{r*} = GR \times \Psi_r(nT) \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a(nT) &= [\Psi_r(nT) - \Psi_r(nT - T)] / T \\ &= [\Psi_e(nT) - 2\Psi_e(nT - T) + \Psi_e(nT - 2T)] / T^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\Psi_{a*} = GA \times \Psi_a(nT) \quad (5.6)$$

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (5.7)$$

$$\delta_c(nT) = GU \times dU(nT) \quad (5.8)$$

$$\delta_c(nT) = \delta_c(nT) + \delta_c(nT - T) \quad (5.9)$$

여기서 n 과 T 는 양의 정수와 샘플링 시간을 나타낸다. 그리고 $\Psi(nT)$, $\Psi_e(nT)$, $\Psi_r(nT)$, $\Psi_a(nT)$ 는 각각 샘플링 시각 nT 에서 선박의 회두각, 회두각 오차, 오차의 속도 성분, 오차의 가속도 성분을 나타내며 GE , GR , GA , GU 는 각각 Ψ_e , Ψ_r , Ψ_a , δ 의 퍼지화 스케일 상수이며, 퍼지 PID제어기의 제어이득이 된다. dU_1 , dU_2 는 퍼지 제어블록 1, 2의 출력을 표시하고, δ_c 는 제어입력(조타명령각)을 나타낸다.

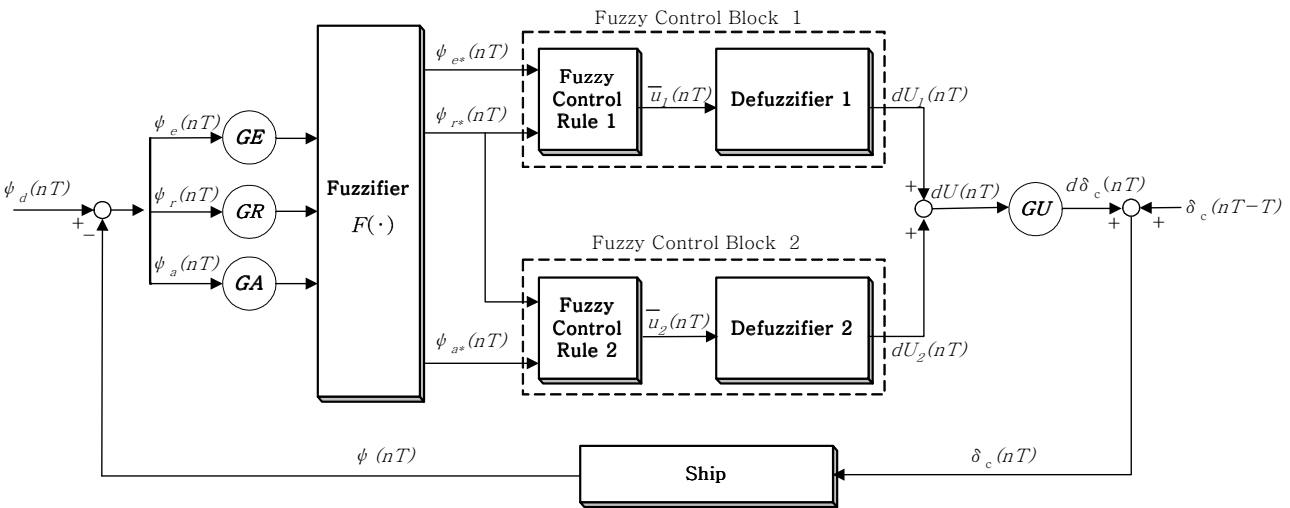


그림 5.2 비선형 퍼지 PID 오토파일럿의 구조

Fig. 5.2 Structure of a nonlinear fuzzy PID auto-pilot

(1) 퍼지화 알고리즘

그림 5.3은 스케일된 입력변수 공간에서 정의되는 퍼지집합의 소속함수를 보여준다. 그림 5.3과 같이 ψ_{e*} 에는 EP, EN 두 개의 퍼지 집합이 정의되고, ψ_{r*} 에는 RP, RN 두 개의 퍼지 집합, ψ_{a*} 는 AP, AN 두 개의 퍼지집합이 정의된다^[78~80].

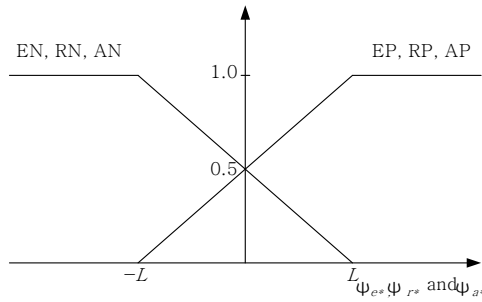
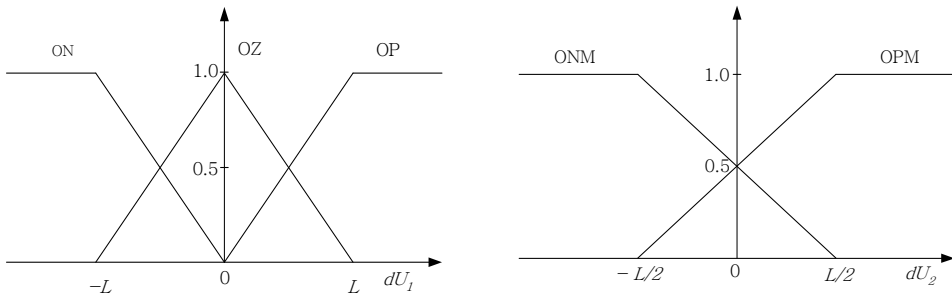


그림 5.3 입력변수의 소속함수

Fig. 5.3 Membership functions for input variables

dU_1 에서 그림 5.4(a)와 같이 OP, OZ, ON 세 개의 퍼지집합이 정의 되고, dU_2 에서 그림 5.4(b)와 같이 OPM, ONM 두 개의 퍼지집합이 정의된다.



(a) 퍼지 제어블록 1

(b) 퍼지 제어블록2

그림 5.4 출력변수의 소속함수

Fig. 5.4 Membership functions for output variables

(2) 퍼지 제어규칙

퍼지 제어블록1과 2에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다^[78~80].

fuzzy control block 1	
(R1) ₁ :	IF $\psi_{e^*} = EP$ and $\psi_{r^*} = RP$ THEN $dU_1 = OP$
(R2) ₁ :	IF $\psi_{e^*} = EP$ and $\psi_{r^*} = RN$ THEN $dU_1 = OZ$
(R3) ₁ :	IF $\psi_{e^*} = EP$ and $\psi_{r^*} = RP$ THEN $dU_1 = OZ$
(R4) ₁ :	IF $\psi_{e^*} = EP$ and $\psi_{r^*} = RN$ THEN $dU_1 = ON$
fuzzy control block 2	
(R1) ₂ :	IF $\psi_{r^*} = RP$ and $\psi_{d^*} = AP$ THEN $dU_2 = OPM$
(R2) ₂ :	IF $\psi_{r^*} = RP$ and $\psi_{d^*} = AN$ THEN $dU_2 = ONM$
(R3) ₂ :	IF $\psi_{r^*} = RN$ and $\psi_{d^*} = AP$ THEN $dU_2 = OPM$
(R4) ₂ :	IF $\psi_{r^*} = RN$ and $\psi_{d^*} = AN$ THEN $dU_2 = ONM$

퍼지 추론논리를 제어블록1, 2에 적용하기 위한 입력공간은 그림 5와 같다. 그림 5.5(a)는 제어블록1의 ψ_{e^*} 와 ψ_{r^*} 에 대한 입력공간 분할을 나타낸 것이고, 그림 5.5(b)는 제어블록2에서의 ψ_{r^*} 와 ψ_{d^*} 에 대한 입력공간 분할을 나타낸 것이다.

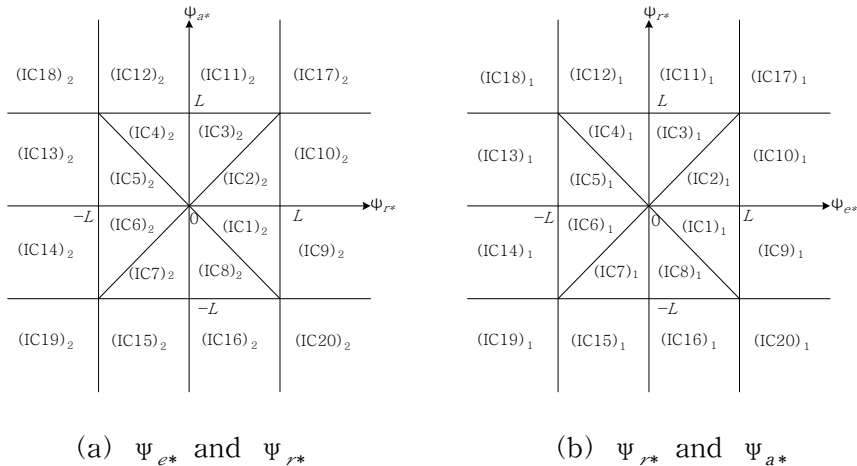


그림 5.5 입력 공간 분할

Fig. 5.5 Partition of input variables

(3) 비퍼지화 알고리즘

비퍼지화기는 (5.10)과 같은 중심평균법을 사용하였다^[81,82].

$$dU_j = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_{dU_j}(w_i) \times w_i}{\sum_{i=0}^n \mu_{dU_j}(w_i)} \quad j=1,2 \quad (5.10)$$

여기서 n 은 규칙의 수, w_i 는 멤버의 값, 그리고 $\mu_{output}(w_i)$ 는 소속정도를 나타낸다.

퍼지 제어블록1에 대해 출력 퍼지집합을 L 구간 내의 영역 (IC1)₁, (IC2)₁, (IC5)₁, (IC6)₁에서 비퍼지화하면 다음과 같고,

$$IF \quad GR \times |\Psi_r(nT)| \leq GE \times |\Psi_e(nT)| \leq L, \\ dU_1(nT) = \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |\Psi_e(nT)|} [GE \times \Psi_e(nT) + GR \times \Psi_r(nT)] \quad (5.11)$$

영역 (IC3)₁, (IC4)₁, (IC7)₁, (IC8)₁에서 비퍼지화하면 다음과 같다.

$$IF \quad GE \times |\Psi_e(nT)| \leq GR \times |\Psi_r(nT)| \leq L, \\ dU_1(nT) = \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |\Psi_e(nT)|} [GE \times \Psi_e(nT) + GR \times \Psi_r(nT)] \quad (5.12)$$

퍼지 제어블록2에 대해 출력 퍼지집합을 L 구간 내의 영역 (IC1)₂, (IC2)₂, (IC5)₂, (IC6)₂에서 비퍼지화하면 다음과 같고,

$$IF \quad GA \times |\Psi_a(nT)| \leq GR \times |\Psi_r(nT)| \leq L, \\ dU_2(nT) = \frac{0.25 \times L}{2L - GR \times |\Psi_r(nT)|} [GA \times \Psi_a(nT)] \quad (5.13)$$

영역 (IC3)₂, (IC4)₂, (IC7)₂, (IC8)₂에서 비퍼지화하면 다음과 같다.

$$IF \quad GR \times |\Psi_r(nT)| \leq GA \times |\Psi_a(nT)| \leq L, \\ dU_2(nT) = \frac{0.25 \times L}{2L - GA \times |\Psi_a(nT)|} [GA \times \Psi_a(nT)] \quad (5.14)$$

퍼지 제어블록 1의 ψ_{e^*} 나 ψ_{r^*} 가 $[-L, L]$ 의 구간 밖에 존재하는 경우와 퍼지 제어블록2의 ψ_{r^*} 나 ψ_{d^*} 의 값이 구간 $[-L, L]$ 을 벗어나는 경우에 대한 출력값은 표 5.1과 같다.

표 5.1 $[-L, L]$ 구간을 벗어난 경우의 증분출력

Table 5.1 The incremental output for scaled inputs outside interval $[-L, L]$

		Input combinations	Output	
fuzzy control block 1	ψ_{e^*} and ψ_{r^*}	(IC9) ₁ , (IC10) ₁	$dU_1(nT)$	$[GR \times \psi_r(nT) + L] / 2$
		(IC11) ₁ , (IC12) ₁		$[GE \times \psi_e(nT) + L] / 2$
		(IC13) ₁ , (IC14) ₁		$[GR \times \psi_r(nT) - L] / 2$
		(IC15) ₁ , (IC16) ₁		$[GE \times \psi_e(nT) - L] / 2$
		(IC17) ₁		L
		(IC18) ₁ , (IC20) ₁		0
		(IC19) ₁		$-L$
fuzzy control block 2	ψ_{r^*} and ψ_{d^*}	(IC9) ₂ , (IC10) ₂ , (IC13) ₂ , (IC14) ₂	$dU_2(nT)$	$0.5 \times GA \times \psi_a(nT)$
		(IC11) ₂ , (IC12) ₂ , (IC17) ₂ , (IC18) ₂		$0.5 \times L$
		(IC15) ₂ , (IC16) ₂ , (IC19) ₂ , (IC20) ₂		$-0.5 \times L$

따라서 FLC의 출력 $dU(nT)$ 는 퍼지 제어블록1의 출력 $dU_1(nT)$ 와 퍼지 제어블록2의 출력 $dU_2(nT)$ 의 산술적인 합으로 구해지고, 출력 스케일러 GU 를 곱하여 플랜트에 인가하는 제어신호의 증분 $d\delta_c(nT)$ 를 생성한다. 결과적으로 FLC의 출력 $dU(nT)$ 와 증분제어입력 $d\delta_c(nT)$ 는 다음과 같다.

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (5.15)$$

$$d\delta_c(nT) = GU \times dU(nT) \quad (5.16)$$

(4) 비선형 퍼지 PID제어기의 제어칙

퍼지 PID제어기 설계 시, 퍼지화 과정에서 생성되는 입력 공간을 다시 정리하면 표 5.2와 같다.

표 5.2 퍼지화기에 의해 분할되는 퍼지 입력공간

Table 5.2 Fuzzy spaces generated by fuzzifier

	below $-L$	between $-L$ and L	above L
Ψ_{e^*}	$-L$	$GE \cdot \Psi_e$	L
Ψ_{r^*}	$-L$	$GR \cdot \Psi_r$	L
Ψ_{a^*}	$-L$	$GA \cdot \Psi_a$	L

위의 입력 조건을 전건부로 하면 (5.17)과 같은 간단한 형태의 퍼지 PID제어기 제어칙을 유도할 수 있다.

$$IF \ GE \cdot |\Psi_e| > L \quad THEN \ GE \cdot |\Psi_e| = L$$

$$IF \ GR \cdot |\Psi_r| > L \quad THEN \ GR \cdot |\Psi_r| = L$$

$$IF \ GA \cdot |\Psi_a| > L \quad THEN \ GA \cdot |\Psi_a| = L$$

$$\begin{aligned} \delta_c(nT) &= K_i(nT)\Psi_e(nT) + K_p(nT)\Psi_r(nT) + K_d(nT)\Psi_a(nT) \\ &= \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - \max(GE \times |\Psi_e(nT)|, GR \times |\Psi_r(nT)|)} \Psi_e(nT) \\ &\quad + \frac{0.5 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(GE \times |\Psi_e(nT)|, GR \times |\Psi_r(nT)|)} \Psi_r(nT) \\ &\quad + \frac{0.25 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(GR \times |\Psi_r(nT)|, GA \times |\Psi_a(nT)|)} \Psi_a(nT) \end{aligned} \quad (5.17)$$

여기서, 적분계인 $K_i(nT)$, 비례계인 $K_p(nT)$, 미분계인 $K_d(nT)$ 는 각각 다음과 같다.

$$K_i(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - \max(GE \times |\Psi_e(nT)|, GR \times |\Psi_r(nT)|)} \quad (5.18)$$

$$K_p(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU \times GR}{2L - \max(|GE \times \psi_e(nT)|, |GR \times \psi_r(nT)|)} \quad (5.19)$$

$$K_d(nT) = \frac{0.25 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(|GR \times \psi_r(nT)|, |GA \times \psi_a(nT)|)} \quad (5.20)$$

퍼지 PID제어기의 계인은 ψ_e , ψ_r , ψ_a 가 0에 아주 가까운 값을 가질 때, 즉 정상상태에서 상수값 계인을 갖는다. 상수값 비례계인 K_p^* , 적분계인 K_i^* , 미분계인 K_d^* 은 식 (5.21)과 같다.

$$K_p^* = \frac{GU \times GR}{4}, K_i^* = \frac{GU \times GE}{4}, K_d^* = \frac{GU \times GA}{8} \quad (5.21)$$

퍼지 PID제어기의 계인은 안정한 선형 PID제어기의 계인으로부터 (5.22)와 (5.23)을 통해 구할 수 있다. 소이득 정리^[83,84]를 통해 (5.22)와 (5.23)의 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 선형 PID제어기와 동일한 안정도를 갖는 것으로 증명되었다^[85~89].

$$\frac{GU \cdot GE}{4} = K_i^c, \quad \frac{GU \cdot GR}{4} = K_p^c, \quad \frac{GU \cdot GA}{8} = K_d^c \quad (5.22)$$

$$GU = T, \quad GE = \frac{4K_i^c}{T}, \quad GR = \frac{4K_p^c}{T}, \quad GA = \frac{8K_d^c}{T} \quad (5.23)$$

퍼지 PID제어기의 비례, 미분, 적분 계인의 변화를 그림 5.6에 나타내었다. 퍼지 PID제어기의 적분 계인과 비례 계인은 스케일된 오차 ψ_{e^*} 와 스케일된 오차의 속도성분 ψ_{r^*} 가 0일 때, 선형 PID제어기와 동일한 계인을 갖게 되고, ψ_{e^*} 와 ψ_{r^*} 가 퍼지 분할 변수 L 에 가까워지면 선형 PID제어기의 계인 값의 2배까지 비선형적으로 변화한다. ψ_{e^*} 와 ψ_{r^*} 가 퍼지 분할 변수 L 를 넘어서면 제어기 출력이 L 로 고정된다. 또한, 퍼지 PID 제어기의 미분 계인은 스케일된 오차의 속도성분 ψ_{r^*} 와 스케일된 오차의 가속도성분 ψ_{a^*} 가 0에서 퍼지 분할 변수 L 까지 변화함에 따라 선형 PID제어기의 계인에서 계인의 2배까지 비선형적으로 변화된다. ψ_{r^*} 와 ψ_{a^*} 가 퍼지 분할 변수 L 를 넘어서면 제어기 출력이 L 로 고정된다.

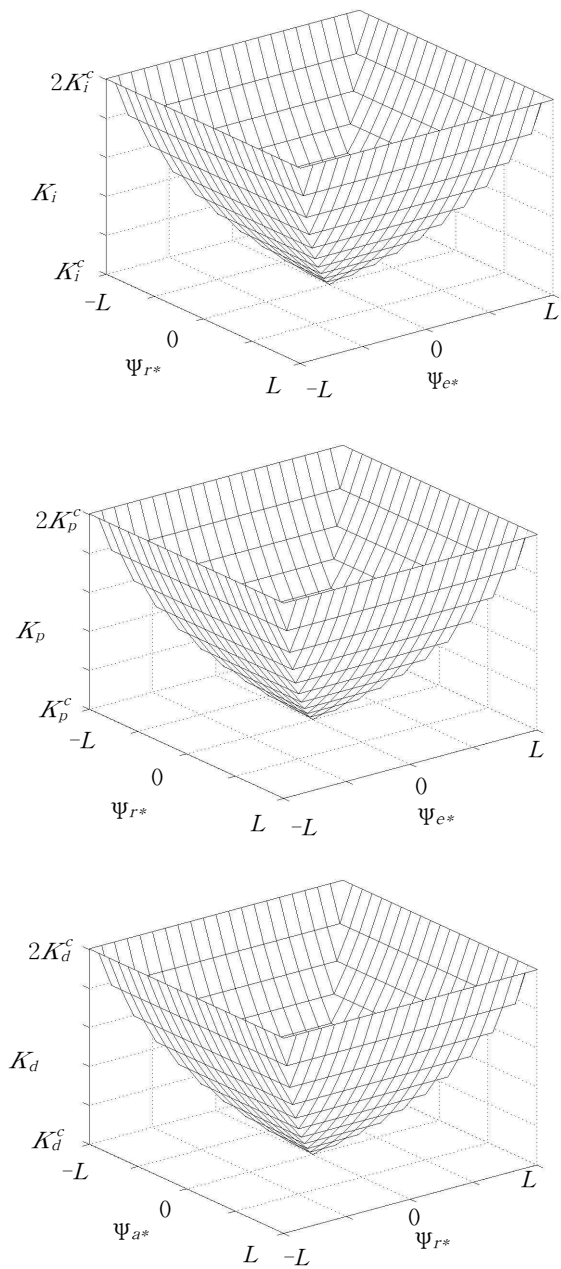


그림 5.6 퍼지 PID 제어기의 게인 스케줄링
 Fig. 5.6 Gain scheduling of the fuzzy PID controller

5.2 시뮬레이션

제안한 LOS가이던스 시스템과 퍼지 PID제어기에 기반한 오토파일럿 시스템의 유효성을 검증하기 위해 실제 선박모델에 적용하여 시뮬레이션을 실시하는 것이 필요하다. 시뮬레이션은 선박 조종성이 안정한 카고쉽과 선박 조종성이 불안정한 오일탱커에 대하여 실시하였다.

5.2.1 카고쉽에 대한 시뮬레이션

Chislett과 Ström-Tejsen은 표 5.3과 같은 선박 제원을 갖는 Mariner Class 선박에 대해 PMM 테스트와 풀 스케일 조종성 및 기동 테스트를 통해 3차원 비선형 모델을 유도하였다^[90].

표 5.3 카고쉽의 선박 제원

Table 5.3 The specifications of Mariner Class Vessel

	Dimensions	Value
Length overall (L_{oa})	[m]	171.80
Length between perpendiculars (L_{pp})	[m]	160.93
Maximum beam (B)	[m]	23.17
Design draft (T)	[m]	8.23
Design displacement (∇)	[m ³]	18541
Design speed	[knots]	15

전진방향, 횡방향, 회두 방향에 대한 동적 운동 방정식은

$$\begin{bmatrix} m' - x'_{\ddot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m' - Y'_{\ddot{v}} & m'x'_G - Y'_{\ddot{r}} \\ 0 & m'x'_G - N'_{\ddot{v}} & I_z - N'_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{u} \\ \Delta \ddot{v} \\ \Delta \ddot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta N' \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

이 되고, 무차원 변수로 수선간 길이 L_{pp} 와 선박의 전체속도 U 를 이용하여 비선형 힘과 모멘트를 무차원화하면

$$\begin{aligned}
 \Delta X' &= X'_u \Delta u' + X'_{uu} \Delta u'^2 + X'_{uuu} \Delta u'^3 + X'_{vv} \Delta v'^2 + X'_{rr} \Delta r'^2 + X'_{rv} \Delta r' \Delta v' \\
 &\quad + X'_{\delta\delta} \Delta \delta'^2 + X'_{u\delta\delta} \Delta u' \Delta \delta'^2 + X'_{v\delta} \Delta v' \Delta \delta' + X'_{u\delta} \Delta u' \Delta v' \Delta \delta' \\
 \Delta Y' &= Y'_v \Delta v' + Y'_r \Delta r' + Y'_{vv} \Delta v'^3 + Y'_{vvr} \Delta v'^2 \Delta r' + Y'_{vu} \Delta v' \Delta u' + Y'_{ru} \Delta r' \Delta u' \\
 &\quad + Y'_\delta \Delta \delta' + Y'_{\delta\delta\delta} \Delta \delta'^3 + Y'_{u\delta} \Delta u' \Delta \delta' + Y'_{uu\delta} \Delta u'^2 \Delta \delta' + Y'_{v\delta\delta} \Delta v' \Delta \delta'^2 \\
 &\quad + Y'_{vv\delta} \Delta v'^2 \Delta \delta' + (Y_0' + Y_0'_u \Delta u' + Y_0'_{uu} \Delta u'^2) \\
 \Delta N' &= N'_v \Delta v' + N'_r \Delta r' + N'_{vv} \Delta v'^3 + N'_{vvr} \Delta v'^2 \Delta r' + N'_{vu} \Delta v' \Delta u' + N'_{ru} \Delta r' \Delta u' \\
 &\quad + N'_\delta \Delta \delta' + N'_{\delta\delta\delta} \Delta \delta'^3 + N'_{u\delta} \Delta u' \Delta \delta' + N'_{uu\delta} \Delta u'^2 \Delta \delta' + N'_{v\delta\delta} \Delta v' \Delta \delta'^2 \\
 &\quad + N'_{vv\delta} \Delta v'^2 \Delta \delta' + (N_0' + N_0'_u \Delta u' + N_0'_{uu} \Delta u'^2)
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

이 된다. 여기서, 무차원 계수는

$$m' = 798 \cdot 10^{-5}; \quad I'_z = 39.2 \cdot 10^{-5}; \quad x'_G = -0.023 \tag{5.26}$$

이다. (5.26)의 무차원 계수를 이용하여 유체력 미계수를 무차원화한 결과는 표 5.4와 같다.

30°, 45°, 60°, 90°의 다양한 변침각에 대한 퍼지 PID형 오토파일럿 시스템의 시뮬레이션 결과를 선형 PD제어기형 오토파일럿 시스템의 응답과 비교하여 그림 5.7에 나타내었다. 퍼지 PID제어기형과 선형 PD제어기형 모두 비슷한 응답을 나타내지만, 그림 5.7(b)에서 보는 것처럼 선형 PD제어기형은 0.6°정도의 정상상태 오차를 갖는 반면, 퍼지 PID제어기형은 정상상태 오차를 갖지 않는다. 또한, 선형 PD제어기형은 변침각에 따라 응답 곡선의 기울기가 다르게 나타나지만, 퍼지 PID제어기형은 응답 곡선의 기울기가 일정하다. 이러한 퍼지 PID제어기형 오토파일럿의 특성

은 변침각이 큰 경우 선회각속도를 가속 구간, 등속 구간, 감속 구간으로 구성하는 역할을 하여 큰 오버슈트 없이 제어가 가능하게 한다.

변침각 30°, 45°, 60°, 90°인 경우의 선형 PD제어기형과 비선형 퍼지 PID제어기형의 시뮬레이션 결과와 제어 입력인 조타각의 변화를 그림 5.8에서 그림 5.11까지 나타내었다. 두 제어기 모두 적절한 제어입력을 생성하여 선박의 변침을 수행하고 있다. PD제어기형 오토파일럿 시스템의 응답을 살펴보면 변침각이 큰 경우 그림 5.11에서 보는 것처럼 상승시간이 빨라진다. 이러한 현상은 변침각이 더 커질 경우 오버슈트를 야기한다.

시뮬레이션에 사용한 퍼지 PID 제어기의 파라미터는 $L = \pi/3$, $GE = 2.75$, $GR = 50$, $GA = 500$, $GU = 1$ 이고, 선형 PD제어기형 오토파일럿의 파라미터는 $K_p = 2$, $K_d = 70$ 이다.

제안한 LOS 가이드 시스템에 대해 PD제어기형 오토파일럿 시스템과 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템을 이용하여 선박의 항로 추종 시뮬레이션을 실시하였다. PD제어기형 오토파일럿 시스템을 이용한 항로 추종 결과는 그림 5.12와 같고, 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템을 이용한 항로 추종 결과는 그림 5.13과 같다. 그림 5.12(b)와 그림 5.13(b)는 항로 추종동안 가이드 시스템이 내리는 유도명령과 오토파일럿에 의한 변침 및 회두각 유지제어 결과를 보여준다. PD제어기형 오토파일럿의 경우 변침각이 큰 경우 오버슈트가 발생하고 이에 따라 항로에서 선박이 이탈되고 이에 따라 조타각의 변화가 심하게 나타나 추진에너지의 손실이 크게 된다. 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템을 이용한 경우, 그림 5.13(a)에서 보는 바와 같이 직선항로와 선회항로에서 항로의 추종이 잘 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 그림 5.13(b)를 보면, 선회 초기에 유도 명령이 크게 인가되어 응답속도가 느린 선박이 적절한 선회동작을 수행하도록 빠른 조타를 유도하고 있음을 볼 수 있다. 항로 추종 동안 조타각의 변화는 그림 5.13(c)에서 보는 바와 같이 부드럽게 나타나고 거친 조타변화에 비해 추진 에너지의 손실이 적게 된다.

표 5.4 Mariner Class 선박에 대한 무차원 유체력 미계수

Table 5.4 Non-dimensional hydrodynamic coefficients for the Mariner Class Vessel

X-equation	Y-equation	N-equation
$X'_{\dot{u}} = -840 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{\dot{v}} = -1546 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\dot{r}} = -9 \cdot 10^{-5}$	$N'_{\dot{v}} = 23 \cdot 10^{-5}$ $N'_{\dot{r}} = -83 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uu} = -184 \cdot 10^{-5}$ $X'_{uuu} = -215 \cdot 10^{-5}$ $X'_{vv} = -899 \cdot 10^{-5}$ $X'_{rr} = 18 \cdot 10^{-5}$ $X'_{\delta\delta} = -95 \cdot 10^{-5}$ $X'_{\delta\delta\delta} = -190 \cdot 10^{-5}$ $X'_{rv} = 798 \cdot 10^{-5}$ $X'_{v\delta} = 93 \cdot 10^{-5}$ $X'_{uu\delta} = 93 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vv} = -1160 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{rr} = -499 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{vvv} = -8078 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{vvr} = 15356 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{vu} = -1160 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{ru} = -499 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\delta} = 278 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\delta\delta\delta} = -90 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{v\delta} = 556 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{uu\delta} = 278 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\delta\delta\delta} = 1190 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\mathcal{O}} = -4 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\mathcal{O}'_u} = -8 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{\mathcal{O}'_{uu}} = -4 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vv} = -264 \cdot 10^{-5}$ $N'_{rr} = -166 \cdot 10^{-5}$ $N'_{vvv} = 1636 \cdot 10^{-5}$ $N'_{vvr} = -5483 \cdot 10^{-5}$ $N'_{vu} = -166 \cdot 10^{-5}$ $N'_{\delta} = -139 \cdot 10^{-5}$ $N'_{\delta\delta\delta} = 45 \cdot 10^{-5}$ $N'_{v\delta} = -278 \cdot 10^{-5}$ $N'_{uu\delta} = -139 \cdot 10^{-5}$ $N'_{v\delta\delta} = 13 \cdot 10^{-5}$ $N'_{vv\delta} = -489 \cdot 10^{-5}$ $N'_{\mathcal{O}} = 3 \cdot 10^{-5}$ $N'_{\mathcal{O}'_u} = 6 \cdot 10^{-5}$ $N'_{\mathcal{O}'_{uu}} = 3 \cdot 10^{-5}$

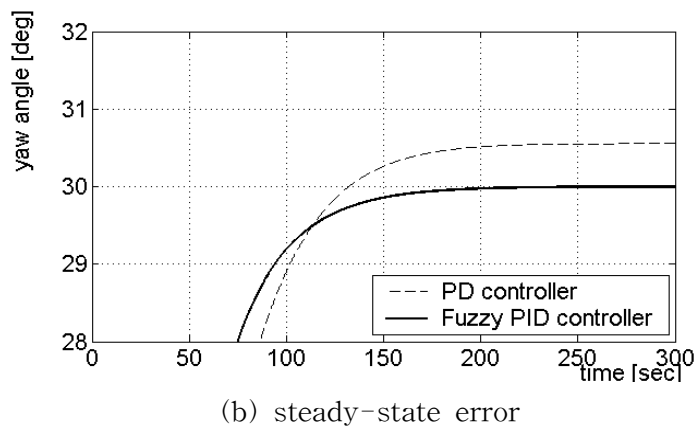
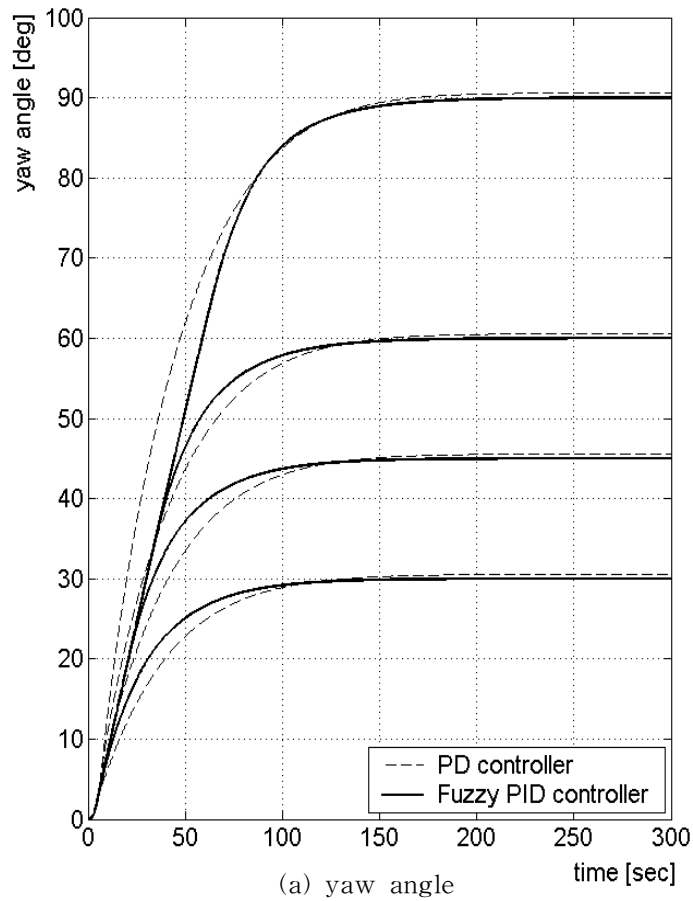
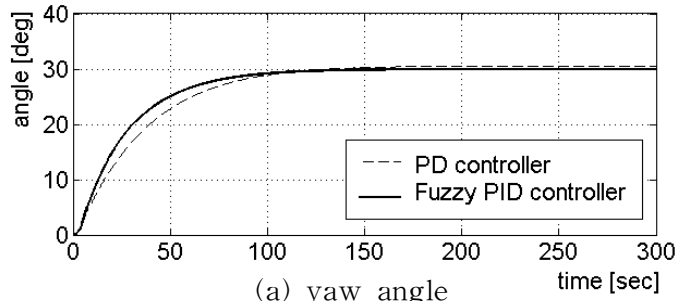
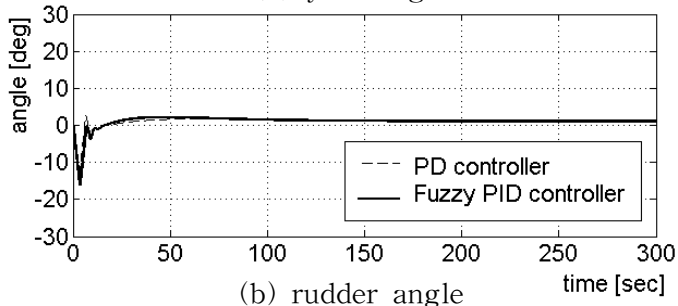


그림 5.7 변침 시뮬레이션

Fig. 5.7 Course-changing simulation



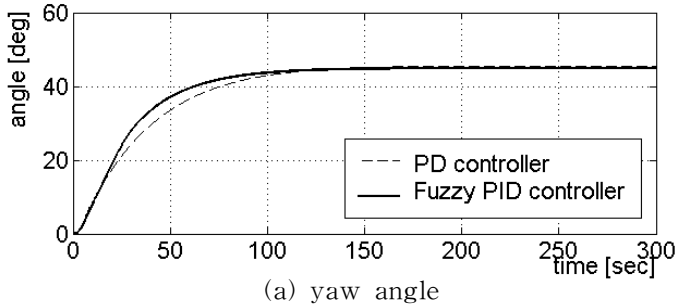
(a) yaw angle



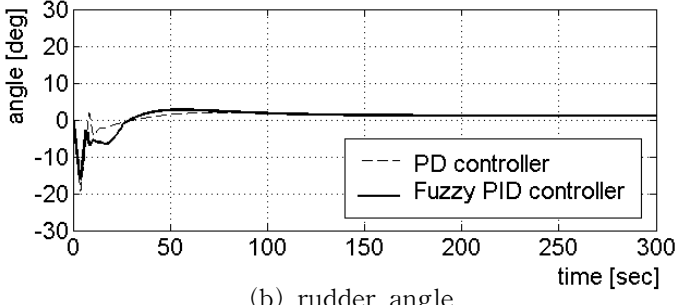
(b) rudder angle

그림 5.8 변침각 30°시물레이션

Fig. 5.8 30°course-changing simulation



(a) yaw angle



(b) rudder angle

그림 5.9 변침각 45°시물레이션

Fig. 5.9 45°course-changing simulation

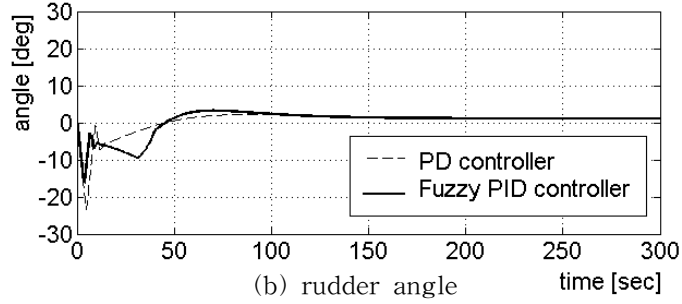
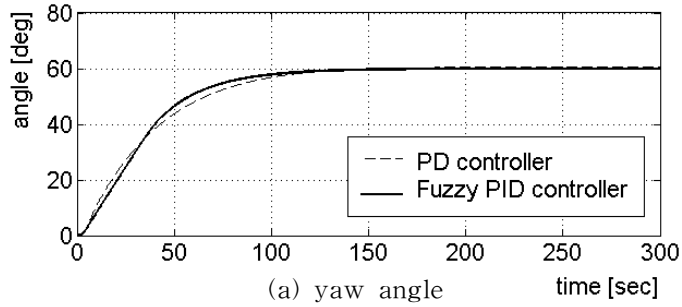


그림 5.10 변침각 60°시물레이션

Fig. 5.10 60°course-changing simulation

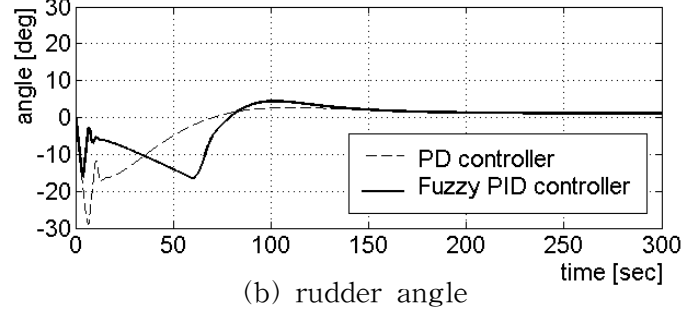
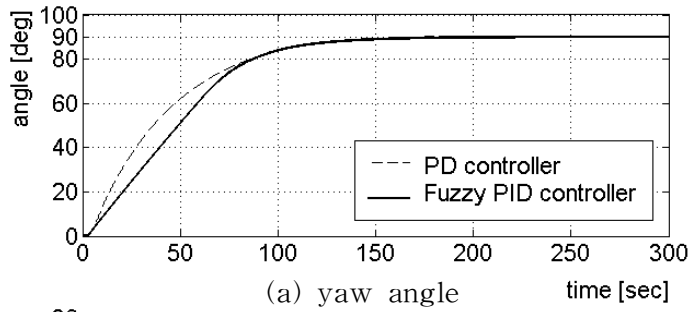
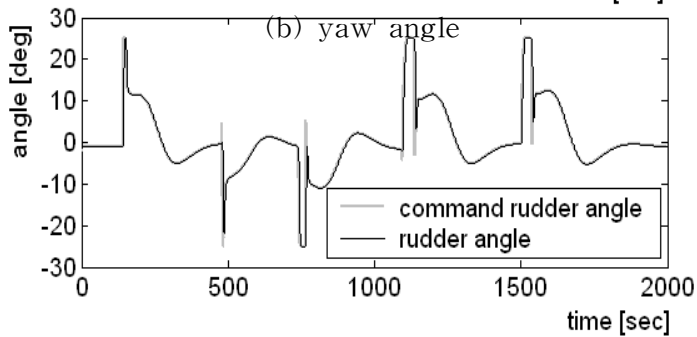
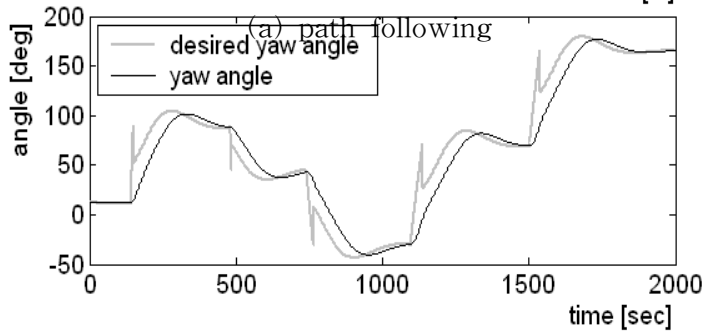
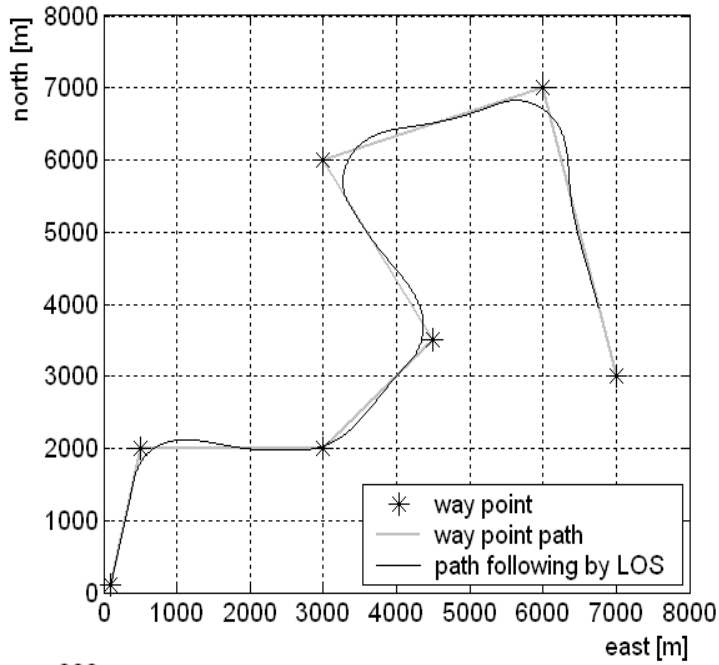


그림 5.11 변침각 90°시물레이션

Fig. 5.11 90°course-changing simulation



(c) control input

그림 5.12 항로 추종 시뮬레이션 결과(PD 제어기)

Fig. 5.12 Simulation result for path following (PD controller)

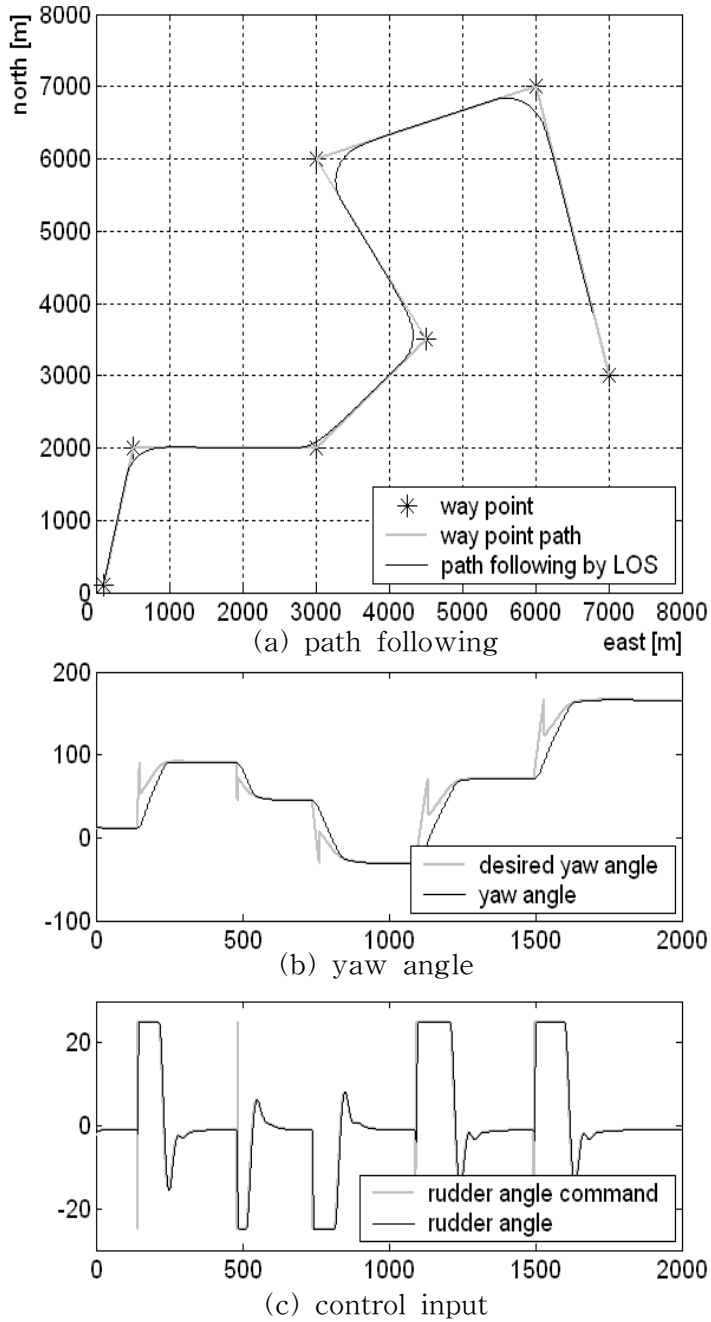


그림 5.13 항로 추종 시뮬레이션 결과(퍼지 PID제어기)

Fig. 5.13 Simulation result for path following (fuzzy PID controller)

5.2.2 오일탱커에 대한 시뮬레이션

Van Berlekom 과 Goddard는 심해역과 천해역에서 대형 탱커선들의 조종성을 묘사하는 수학적 모델을 구하였다^[91]. 이 모델 중의 하나가 190,000톤 오일탱커로 선박의 제원은 표 5.5와 같다.

표 5.5 190,000톤 오일탱커 선박의 제원

Table 5.5 The specifications of the ESSO 190000 dwt tanker

	Dimension	Value
Length between perpendiculars (L_{pp})	[m]	304.8
Beam (B)	[m]	23.17
Draft to design waterline (T)	[m]	18.46
Displacement (∇)	[m ³]	220,000
L_{pp} / B	[-]	6.46
B / T	[-]	2.56
Block coefficient (C_B)	[-]	0.83
Design speed (u_0)	[knots]	16
Nominal propeller	[rpm]	80

심해역과 천해역은 수심 파라미터는

$$\zeta = \frac{T}{h - T} \quad (5.27)$$

과 같이 묘사된다. 여기서, T [m]는 배의 흘수이고, h 는 수심이다.

Bis-System에 의한 무차원 선박의 속도 방정식과 조종 운동 방정식은

$$\begin{aligned} \dot{u} - vr &= gX' \\ \dot{v} + ur &= gY' \\ (Lk''_z)^2 \dot{r} + Lx''_G ur &= gLN'' \end{aligned} \quad (5.28)$$

이다. 여기서, $k''_z = L^{-1} \sqrt{I_z/m}$ 는 무차원 선회 반경이고, $x''_G = L^{-1} x_G$ 이고, X'', Y'', N'' 는 (5.29)와 같은 비선형 무차원 함수이다.

$$\begin{aligned} X'' &= X''(\dot{u}, u, v, r, T, \zeta, c, \delta) \\ Y'' &= Y''(\dot{v}, u, v, r, T, \zeta, c, \delta) \\ N'' &= N''(\dot{r}, u, v, r, T, \zeta, c, \delta) \end{aligned} \quad (5.29)$$

프로펠러 추력 T와 조타기에서의 유속 c는

$$gT'' = L^{-1} T''_{uu} u^2 + T''_{un} un + LT''_{|m|} |m| n \quad (5.30)$$

$$c^2 = c^2_{un} un + c^2_{nn} n^2 \quad (5.31)$$

로 정의된다.

무차원 전진방향, 횡방향, 회두방향 힘과 모멘트는

$$\begin{aligned} gX'' &= X''_{\dot{u}} \dot{u} + L^{-1} X''_{uu} u^2 + X''_{vr} vr + L^{-1} X''_{|d|c\delta\delta} |d|c\delta^2 \\ &\quad + L^{-1} X''_{|d|c\beta\delta} |d|c\beta\delta + gT''(1-\eta) \\ &\quad + X''_{\dot{u}\zeta} \dot{u}\zeta + L^{-1} X''_{u\zeta} u\zeta + X''_{v\zeta} v\zeta + L^{-1} X''_{v\zeta\zeta} v^2\zeta^2 \\ gY'' &= Y''_{\dot{v}} \dot{v} + L^{-1} Y''_{uv} uv + L^{-1} Y''_{|d|v} |d|v + L^{-1} Y''_{|d|c\delta} |d|c\delta + L^{-1} Y''_{ur} ur \\ &\quad + L^{-1} Y''_{|d|c|\beta|\delta} |d|c|\beta|\delta + Y''_T gT'' \\ &\quad + Y''_{u\zeta} u\zeta + L^{-1} Y''_{u\zeta} u\zeta + L^{-1} Y''_{|d|v\zeta} |d|v\zeta + L^{-1} Y''_{|d|c|\beta|\delta|\zeta} |d|c|\beta|\delta|\zeta \\ gLN'' &= L^{-2} N''_{uv} uv + L^{-1} N''_{|d|r} |d|r + L^{-2} N''_{|d|c\delta} |d|c\delta + L^{-1} N''_{ur} ur \\ &\quad + L^{-2} N''_{|d|c|\beta|\delta} |d|c|\beta|\delta + L^{-1} N''_T gT'' \\ &\quad + L^{-1} N''_{u\zeta} u\zeta + L^{-2} N''_{u\zeta} u\zeta + L^{-1} N''_{|d|r\zeta} |d|r\zeta + L^{-2} N''_{|d|c|\beta|\delta|\zeta} |d|c|\beta|\delta|\zeta \end{aligned} \quad (5.32)$$

와 같다. 여기서, 첫 번째 두 줄은 심해역 효과를 나타내고, 마지막 줄은

천해역 효과를 나타낸다. 각 유체력 미계수들은 표 5.6과 같다.

표 5.6 The ESSO190000 dwt 탱커에 대한 무차원 유체력 미계수
 Table 5.6 Non-dimensional hydrodynamic coefficients for the
 ESSO 190000 dwt Tanker (Bis-system)

X-equation		
$1 - X''_{\dot{u}}$	1.050	
X''_{uu}	-0.0377	
$1 + X''_{vr}$	2.020	
X''_{vv}	0.300	
$X''_{d\delta\delta}$	-0.093	
$X''_{d\delta B\delta}$	0.152	$(\beta = v/u)$
X''_T	0.22	(thrust deduction)
$X''_{\dot{u}\dot{z}}$	-0.05	
$X''_{uu\dot{z}}$	-0.0061	additional terms
$X''_{v\dot{z}}$	0.387	in shallow water
$X''_{v\dot{z}\dot{z}}$	0.0125	$\zeta \neq 0$

Y-equation			
$1 - Y''_v$	2.020		
$Y''_{uv} - 1$	-0.752		
Y''_{uw}	-1.205		
Y''_{vd}	-2.400		
$Y''_{dd\delta}$	0.208		
$Y''_{dd \beta \delta }$	-2.16		
Y''_T	0.04		(propeller side force)
$Y''_{v\zeta}$	-0.387		
$Y''_{u\zeta}$	0.182		
$Y''_{u\zeta}$	-0.85	$(1 - \frac{0.8}{\zeta}) \zeta \geq 0.8$	additional terms in shallow water
$Y''_{u\zeta}$	0.0	$\zeta \geq 0.8$	
$Y''_{vd\zeta}$	-1.50		$\zeta \neq 0$
$Y''_{dd \beta \delta \zeta}$	-0.191		

N-equation	
$(k_z'')^2 - N_{rr}'$	0.1232
$N_{ur}'' - x_G''$	-0.231
N_{uv}''	-0.451
$N_{ dr}''$	-0.300
$N_{d\delta}''$	-0.098
$N_{d \beta \delta }''$	0.688
N_T''	-0.02 (propeller yaw moment)
$N_{\tilde{r}}''$	-0.0045
$N_{u\tilde{r}}''$	-0.047
$N_{u\tilde{z}}''$	-0.241
$N_{ d\tilde{r}}''$	-0.120
$N_{d \beta \delta \tilde{z}}''$	0.344

additional terms
in shallow water
 $\zeta \neq 0$

T-equation	
T_{uu}''	-0.00695
T_{un}''	-0.000630
$T_{ nn}''$	0.0000354

c-equation	
c_{un}	$\left\{ \begin{array}{l} 0.605 \\ 38.2 \end{array} \right. \quad n \geq 0$
c_{nn}	
$c=0$	$n < 0$

파랑을 파장과 수심의 비에 따라 분류하면, 수심이 파장의 1/2보다 깊은 중력파를 심해파(Deep water wave)라 하며, 수심이 파장의 1/20보다 얕은 중력파를 천해파(Shallow water wave)라 한다. 천해파는 장파라 불리며, 해저지형의 영향을 받아 굴절이 일어나고 수면에 있는 물입자의 궤도는 변형되어 타원운동을 한다. (5.27)의 수심파라미터는 천해파의 영향을 표현한 것으로 선박의 유체력 미계수는 수심파라미터의 영향을 받아 수심에 따라 그 값이 변한다. 본 논문은 심해역과 천해역에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 심해역시뮬레이션(수심 : 1000m)

30°, 45°, 60°, 90°의 변침각에 대한 퍼지 PID제어기의 시뮬레이션 결과를 선형 PD제어기의 응답과 비교하여 그림 5.14에 나타내었다. 그림 5.14(b)는 선형 PID제어기의 응답이 정상상태 오차를 갖고 퍼지 PID제어기의 응답이 정상상태 오차를 갖지 않는 것을 보여준다. 또한, 앞의 Mariner Class 선박의 경우처럼 선형 PID제어기의 응답 곡선 기울기가 변침각에 따라 다르게 나타나지만, 퍼지 PID제어기의 응답곡선 기울기는 변침각의 크기에 관계없이 동일하게 나타난다.

변침각 30°, 45°, 60°, 90°인 경우의 선형 PD제어기와 비선형 퍼지 PID제어기의 시뮬레이션 결과와 조타각의 변화를 그림 5.15에서 그림 5.18까지 나타내었다. 두 제어기 모두 적절한 제어 입력을 생성하여 선박을 제어하고 있다. 시뮬레이션에 사용한 퍼지 PID 제어기의 파라미터는 $L=\pi/9$, $GE=0.6$, $GR=17.5$, $GA=175$, $GU=1$ 이고, 선형 PD제어기의 파라미터는 $K_p=0.7$, $K_d=25$ 이다.

시뮬레이션은 Mariner Class 선박에 비해 오일탱커의 조종성능이 떨어지기 때문에 급격한 조타에 의해 선박이 불안정해지는 것을 막기 위해 조타각의 크기를 $\pm 10^\circ$ 의 제한을 두고 실시하였다. 제안한 LOS 가이드 시스템에 대해 선형 PD제어기형 오토파일럿과 비선형 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템을 이용하여 선박의 항로 추종 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 5.19는 PD제어기형 오토파일럿 시스템을 이용하여 항로 추종제어를 실시한 결과이다. 카고쉽 시뮬레이션과 같이 선회제어시 오토파일럿 시스템이 선박의 비선형성을 제대로 보상하지 못하고 오버슈트가 발생하면서 항로를 이탈하고 있다. 그림 5.20의 퍼지 PID제어기형 오토파일럿을 이용한 항로 추종제어의 경우 직선항로와 선회항로 모두 항로 추종이 잘 이루어지고 있음을 보여준다. 그림 5.19(b)와 5.20(b)는 항로 추종동안 LOS가이드 시스템의 유도 신호와 오토파일럿에 의한 변침 및 회두각 유지 제어의 결과를 보여준다.

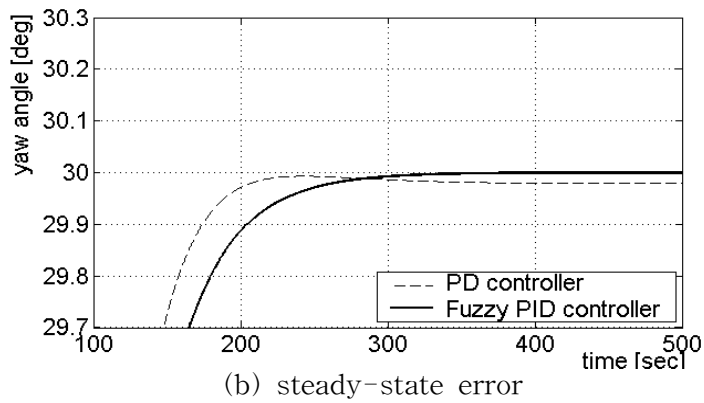
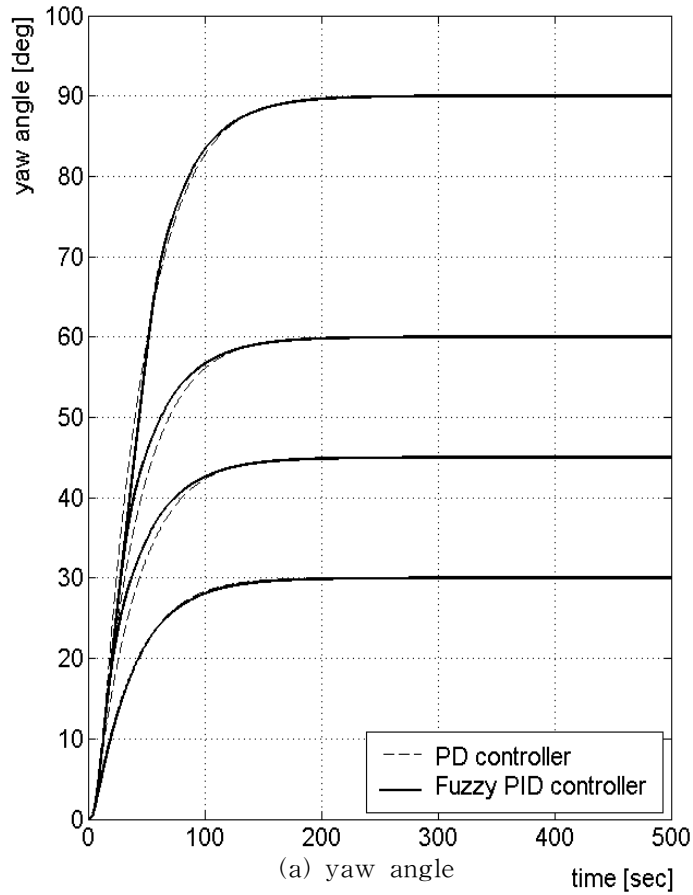
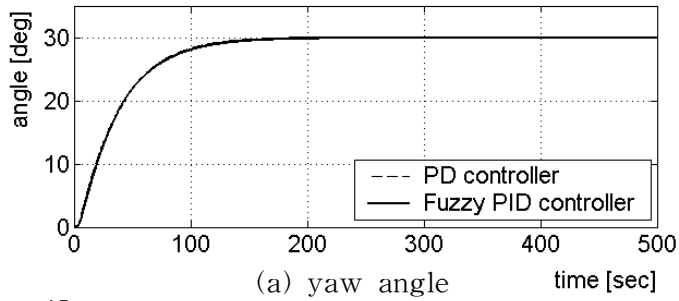
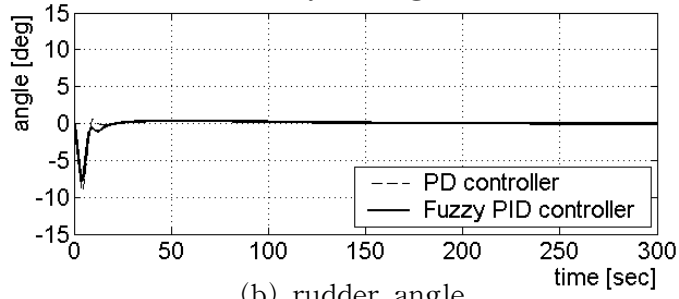


그림 5.14 변침 시뮬레이션

Fig. 5.14 Course-changing simulation



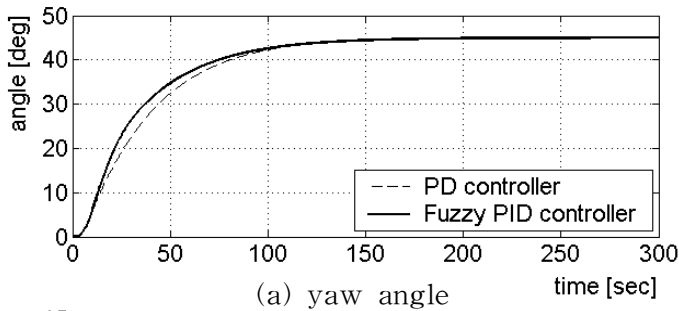
(a) yaw angle



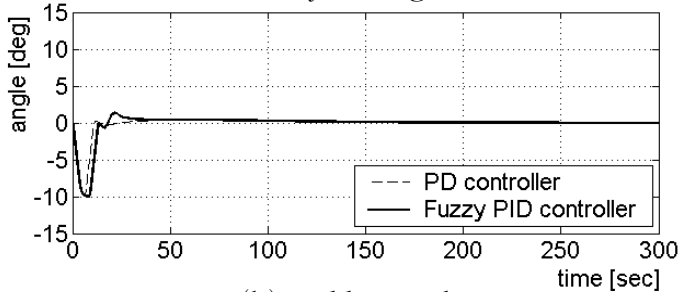
(b) rudder angle

그림 5.15 변침각 30°시물레이션

Fig. 5.15 30°course-changing simulation



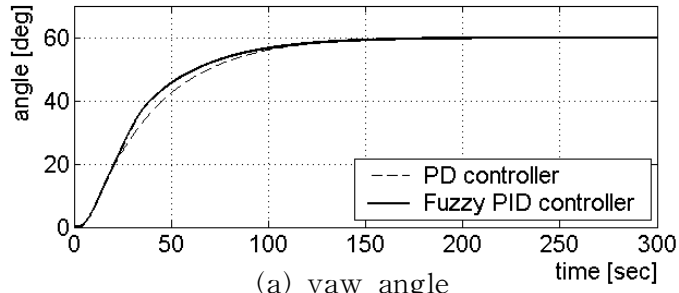
(a) yaw angle



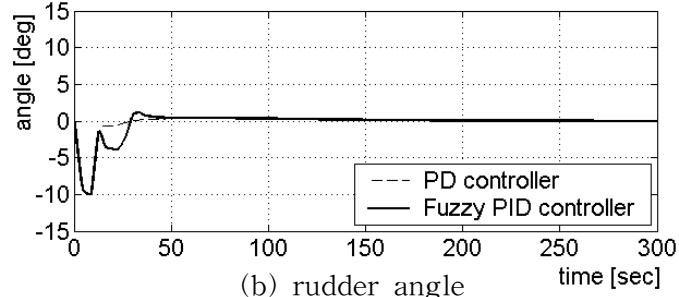
(b) rudder angle

그림 5.16 변침각 45°시물레이션

Fig. 5.16 45°course-changing simulation



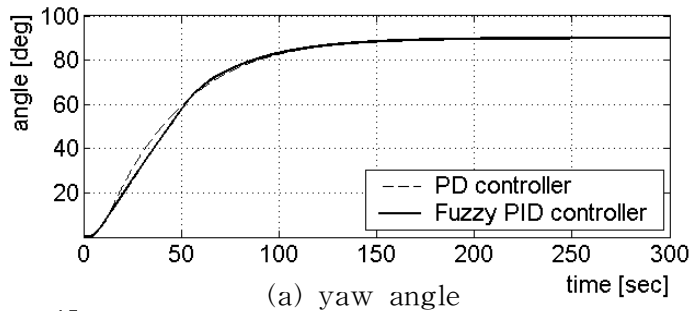
(a) yaw angle



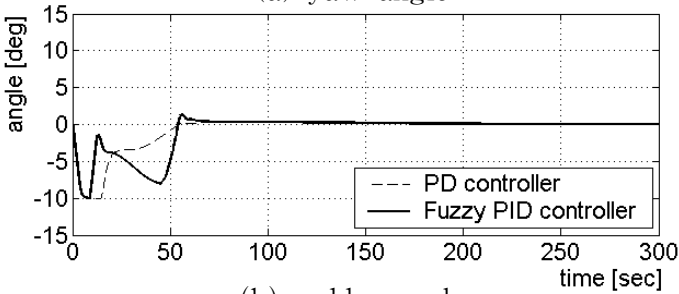
(b) rudder angle

그림 5.17 변침각 60°시뮬레이션

Fig. 5.17 60°course-changing simulation



(a) yaw angle



(b) rudder angle

그림 5.18 변침각 90°시뮬레이션

Fig. 5.18 90°course-changing simulation

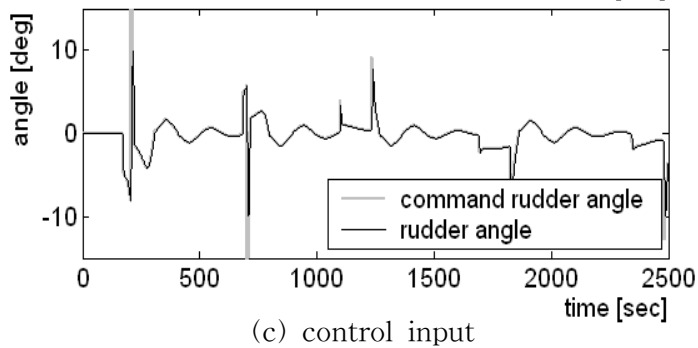
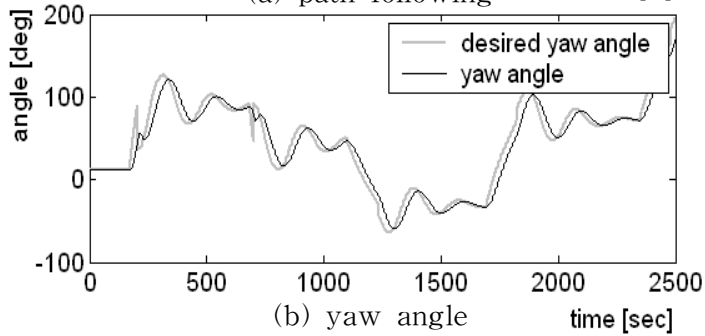
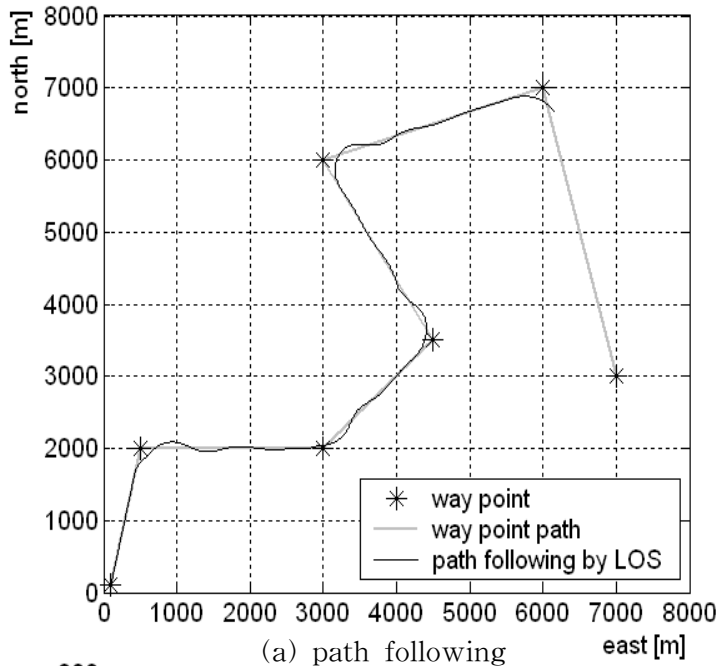


그림 5.19 항로 추종 시뮬레이션 결과 (PD제어기)

Fig. 5.19 Simulation result for path following(PD controller)

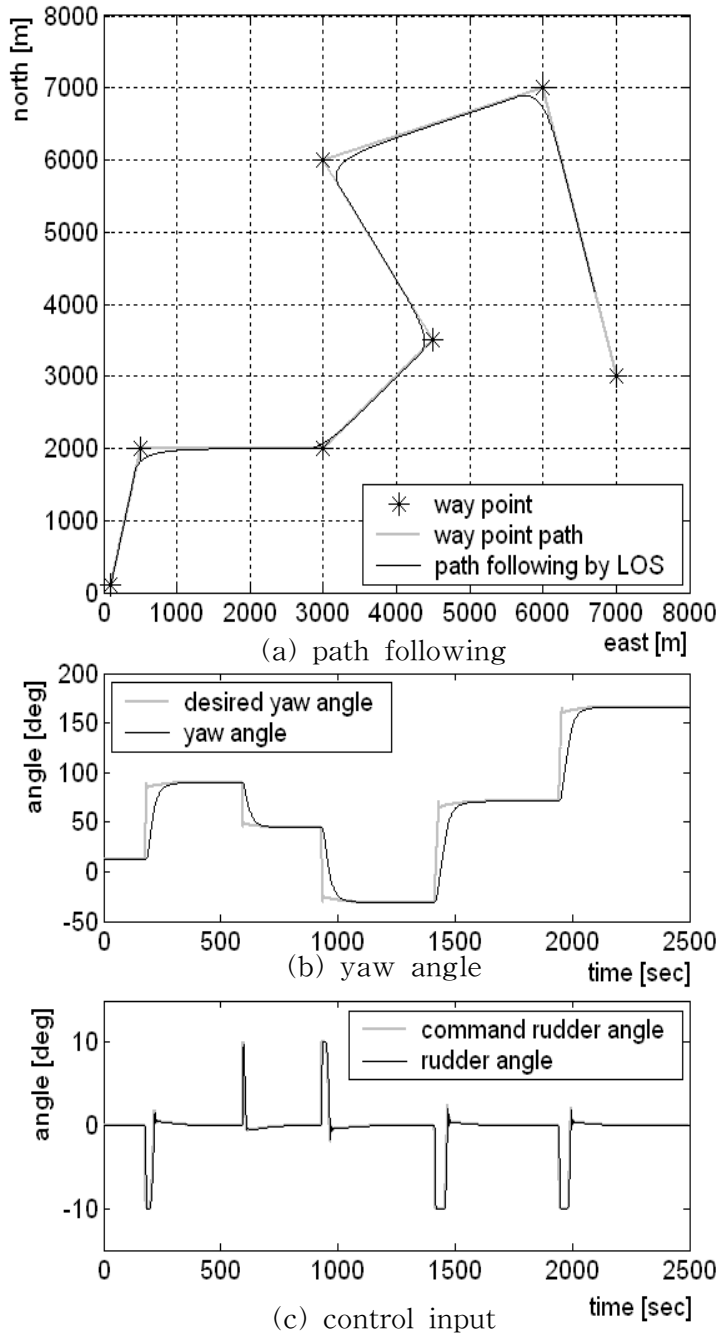


그림 5.20 항로 추종 시뮬레이션 결과 (퍼지 PID제어기)

Fig. 5.20 Simulation result for path following(fuzzy PID controller)

(2) 천해역 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 퍼지 PID 제어기의 파라미터는 $L = \pi/9$, $GE = 0.6$, $GR = 17.5$, $GA = 175$, $GU = 1$ 이고, 선형 PID제어기의 파라미터는 $K_p = 0.7$, $K_d = 25$ 이다.

수심이 얗아지면 천해파에 의한 영향이 강하게 나타나고 선박의 비선형성은 더욱 증대된다. 수심 35m에서 30°, 45°, 60°, 90°의 변침각에 대한 퍼지 PID제어기의 시뮬레이션 결과를 선형 PD제어기의 응답과 비교하여 그림 5.19에 나타내었다. 그림 5.19(b)는 선형 PD제어기의 응답이 정상상태 오차를 갖고 퍼지 PID제어기의 응답이 정상상태 오차를 갖지 않는 것을 보여준다. 또한, 앞의 Mariner Class 선박의 경우처럼 선형 PD제어기의 응답 곡선 기울기가 변침각에 따라 다르게 나타나지만, 퍼지 PID제어기의 응답곡선 기울기는 변침각의 크기에 관계없이 동일하게 나타난다.

변침각 30°, 45°, 60°, 90°인 경우의 선형 PD제어기와 비선형 퍼지 PID제어기의 시뮬레이션 결과와 조타각의 변화를 그림 5.22에서 그림 5.25까지 나타내었다.

일반적으로 천해파 효과는 선박의 침로 안전성을 향상시키고, 선회력을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 선회력의 감소는 천해역에서 선박의 선회 시간을 연장시켜 응급 상황에서 선박의 피항 능력을 감소시킨다. 수심 변화에 따른 제어기의 성능을 시험하기 위해 변침각 60°에 대하여 수심을 40m, 30m, 25m, 20m 로 변화하여 시뮬레이션을 실시하고 결과를 그림 5.26에서 그림 5.29까지 나타내었다. 수심이 얗아짐에 따라 선형 PD제어기의 경우 상승시간이 지연되지만, 퍼지 PID제어기의 경우 일정한 성능을 유지하고 있다. 수심 20m에서 PD제어기의 응답은 그림 5.29에 보는 것처럼 지연되지만, 퍼지 PID제어기의 응답은 지연이 작게 나타난다. 비선형 퍼지 PID 제어기는 수심이 낮아져 천해파의 영향이 강하게 작용하는 경우에도 게인 스케줄링이 작동하기 때문이다. 이러한 결과는 천해역에서

퍼지 PID 제어를 이용한 오토파일럿 시스템이 빠른 응답을 통해 선박의 피항 능력을 향상시켜 응급상황이 많이 발생하는 천해역에서 매우 유용하게 적용될 수 있음을 보여준다.

PD제어기형 오토파일럿 시스템과 비선형 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템을 이용하여 선박의 항로 추종 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 그림 5.30과 5.31에 나타내었다. 그림 (5.30)의 PD제어기형 오토파일럿의 경우 항로 추종이 이루어지지만, 선수동요가 많고 그에 따라 에너지 손실량이 증가하는 양상을 보인다. 그림 5.30의 퍼지 PID제어기형 오토파일럿의 경우 직선항로와 선회항로에서 항로의 추종이 잘 이루어지고 있다. 그림 5.30(b)는 항로 추종동안 LOS가이던스 시스템의 유도 신호와 오토파일럿에 의한 변침 및 회두각 유지 제어의 결과를 보여준다.

그림 5.31은 천해역에서 수심이 변화하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 수심의 변화에 따라 선박의 파라미터가 변화되는 경우에도 퍼지 PID제어기형 오토파일럿이 LOS 가이던스에 의한 유도 명령을 추종하도록 선박을 잘 제어하고 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 퍼지 PID제어기형 오토파일럿 시스템은 선박의 비선형성을 보상하는 능력을 갖고 있고, 정상상태 오차를 발생시키지 않으며 천해역에서의 수심의 변화에 대하여 강인한 성능을 발휘함을 알 수 있다. 변침각이 큰 경우에는 퍼지 분할 변수에 의해 선박의 선회각속도를 일정하게 유지하여 큰 오버슈트를 발생하지 않도록 제어하고 있고, 천해역에서는 빠른 응답을 통하여 연안항해시 빈번히 발생하는 충돌 회피나 장애물 회피 등에 유용하게 적용할 수 있음을 확인할 수 있다.

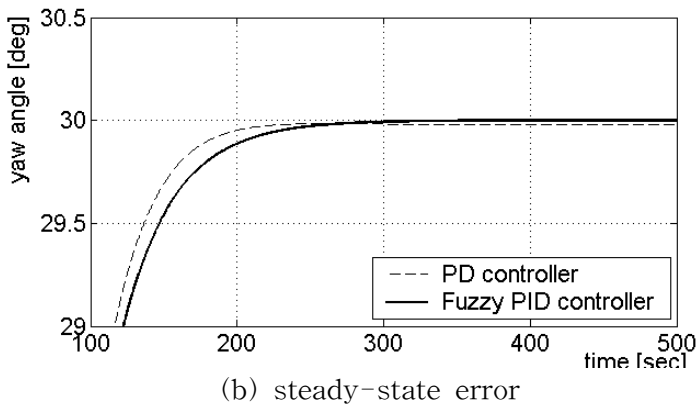
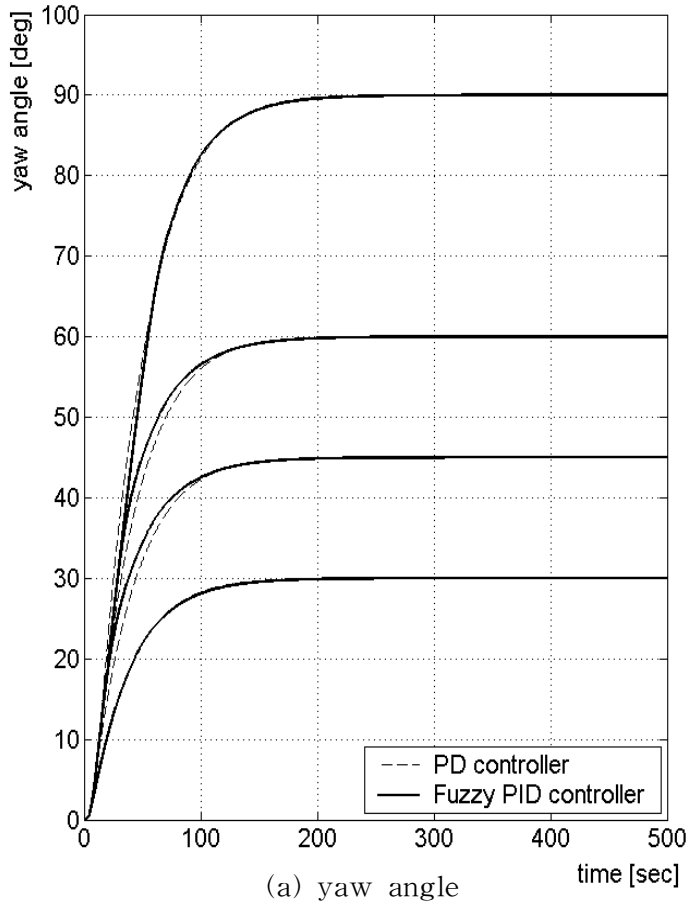
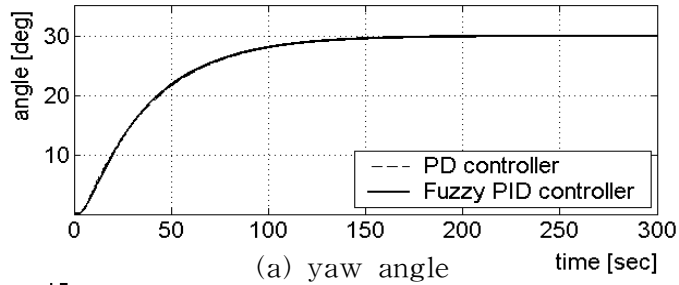
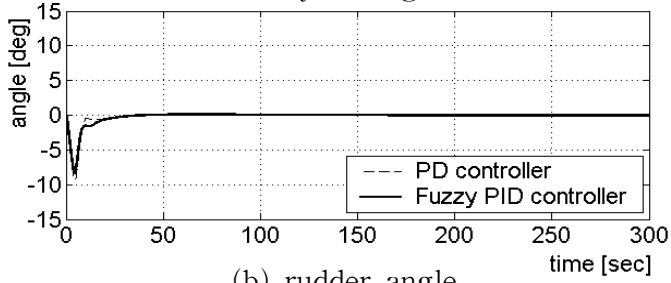


그림 5.21 변침 시뮬레이션

Fig. 5.21 Course-changing simulation



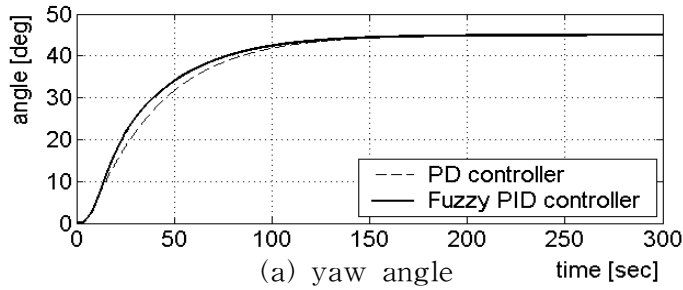
(a) yaw angle



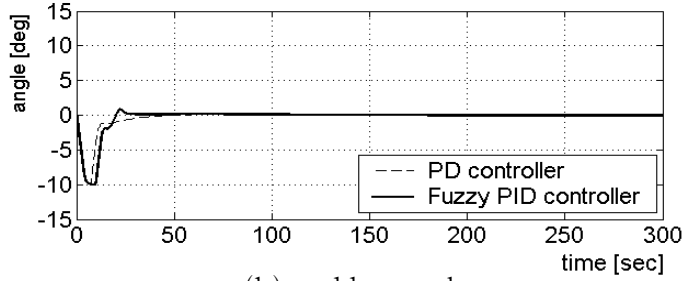
(b) rudder angle

그림 5.22 변침각 30°시물레이션

Fig. 5.22 30°course-changing simulation



(a) yaw angle



(b) rudder angle

그림 5.23 변침각 45°시물레이션

Fig. 5.23 45°course-changing simulation

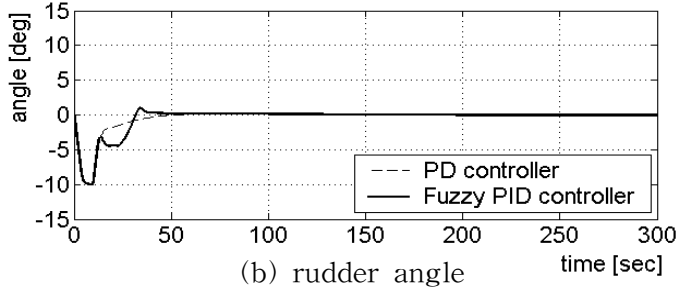
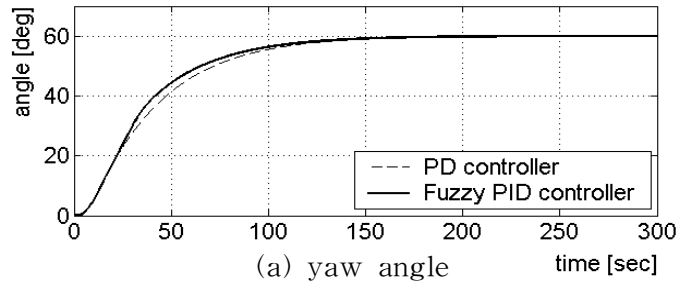


그림 5.24 변침각 60°시물레이션

Fig. 5.24 60°course-changing simulation

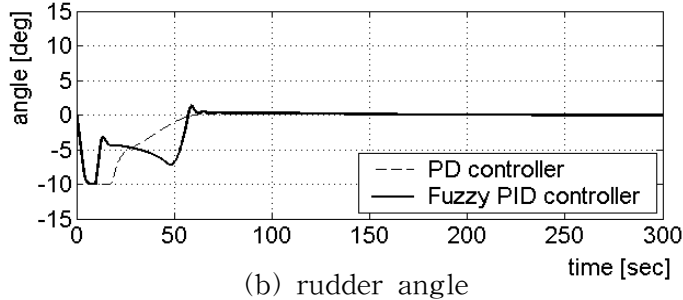
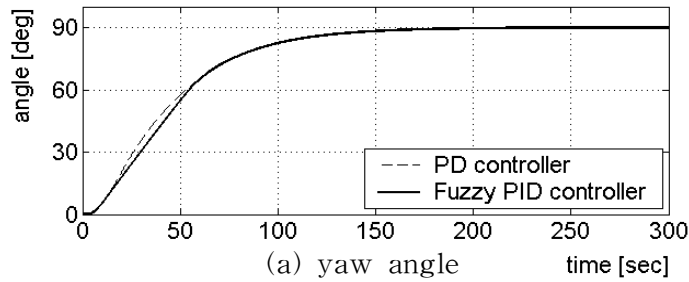
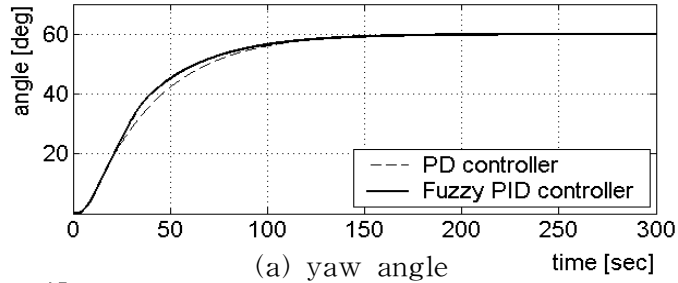
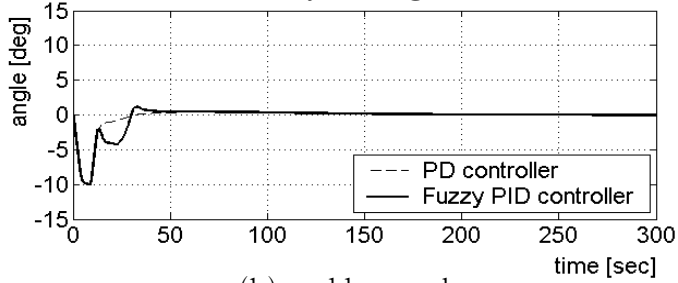


그림 5.25 변침각 90°시물레이션

Fig. 5.25 90°course-changing simulation



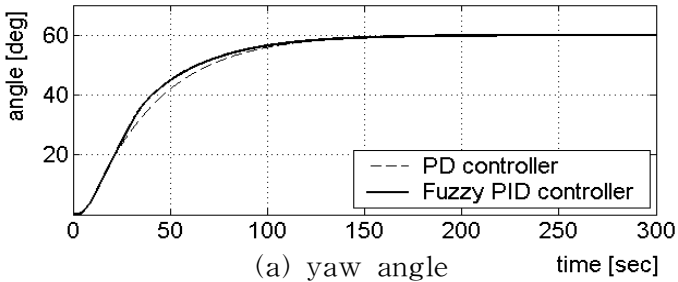
(a) yaw angle



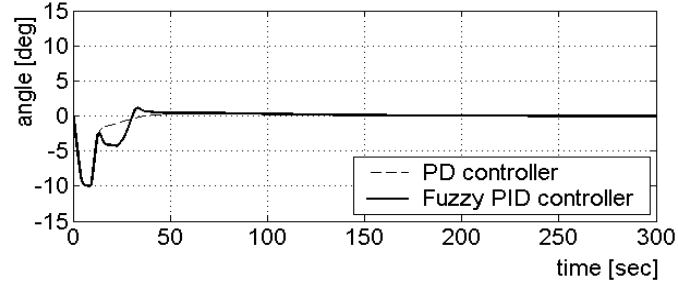
(b) rudder angle

그림 5.26 40m 천해역 시뮬레이션

Fig. 5.26 Shallow water effect simulation (depth : 40m)



(a) yaw angle



(b) rudder angle

그림 5.27 30m 천해역 시뮬레이션

Fig. 5.27 Shallow water effect simulation (depth : 30m)

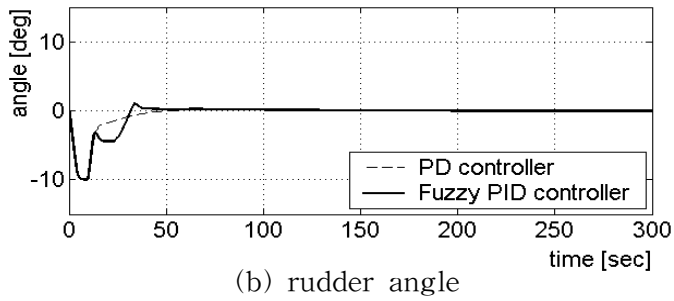
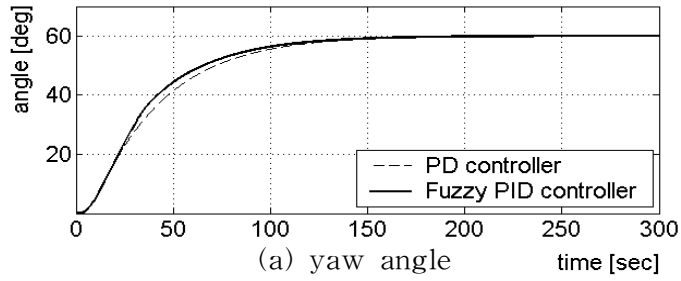


그림 5.28 25m 천해역 시뮬레이션

Fig. 5.28 Shallow water effect simulation (depth : 25m)

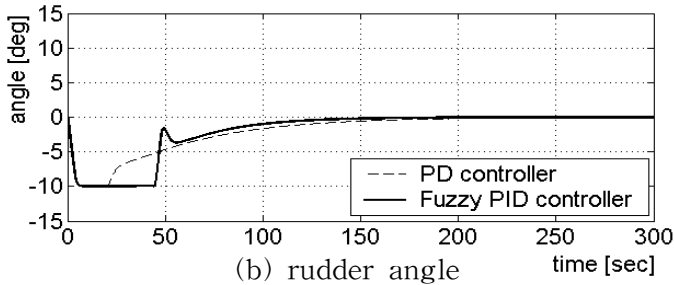
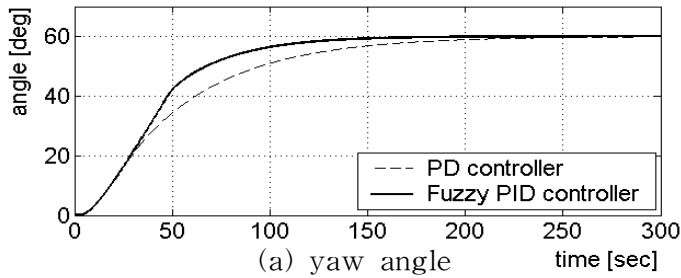
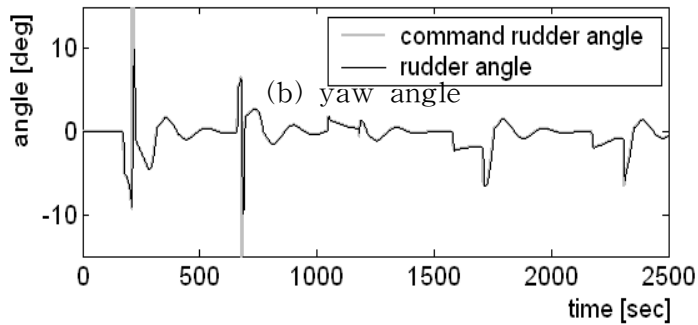
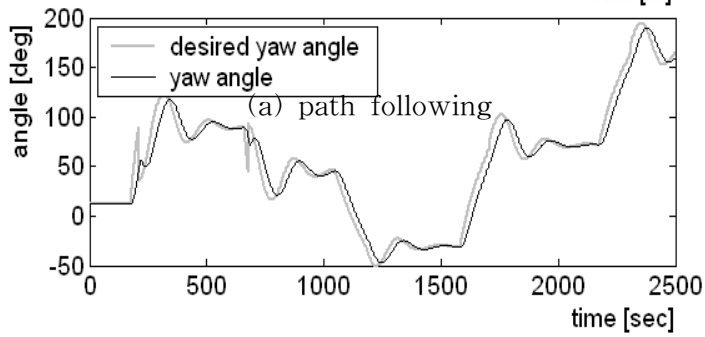
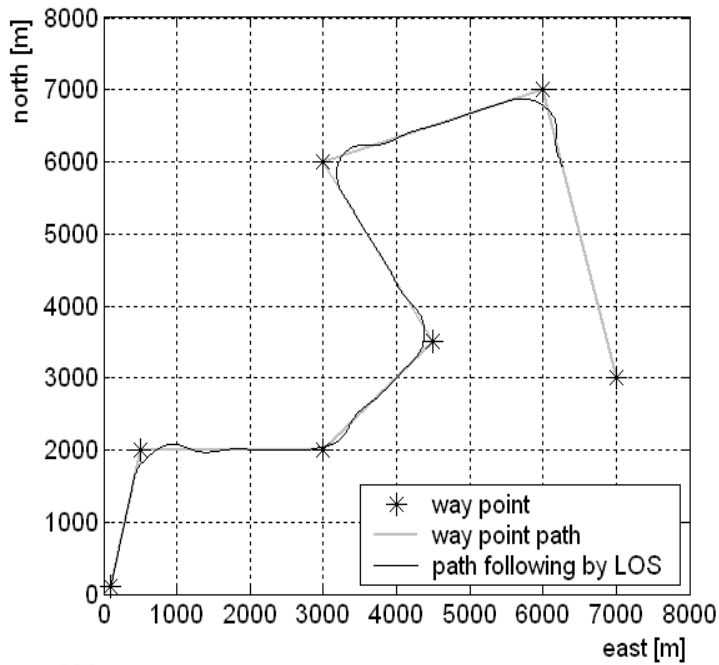


그림 5.29 20m 천해역 시뮬레이션

Fig. 5.29 Shallow water effect simulation (depth : 20m)



(c) control input

그림 5.30 천해역 항로 추종 시뮬레이션 결과 (PD제어기)

Fig. 5.30 Simulation result for path following at shallow water (PD controller)

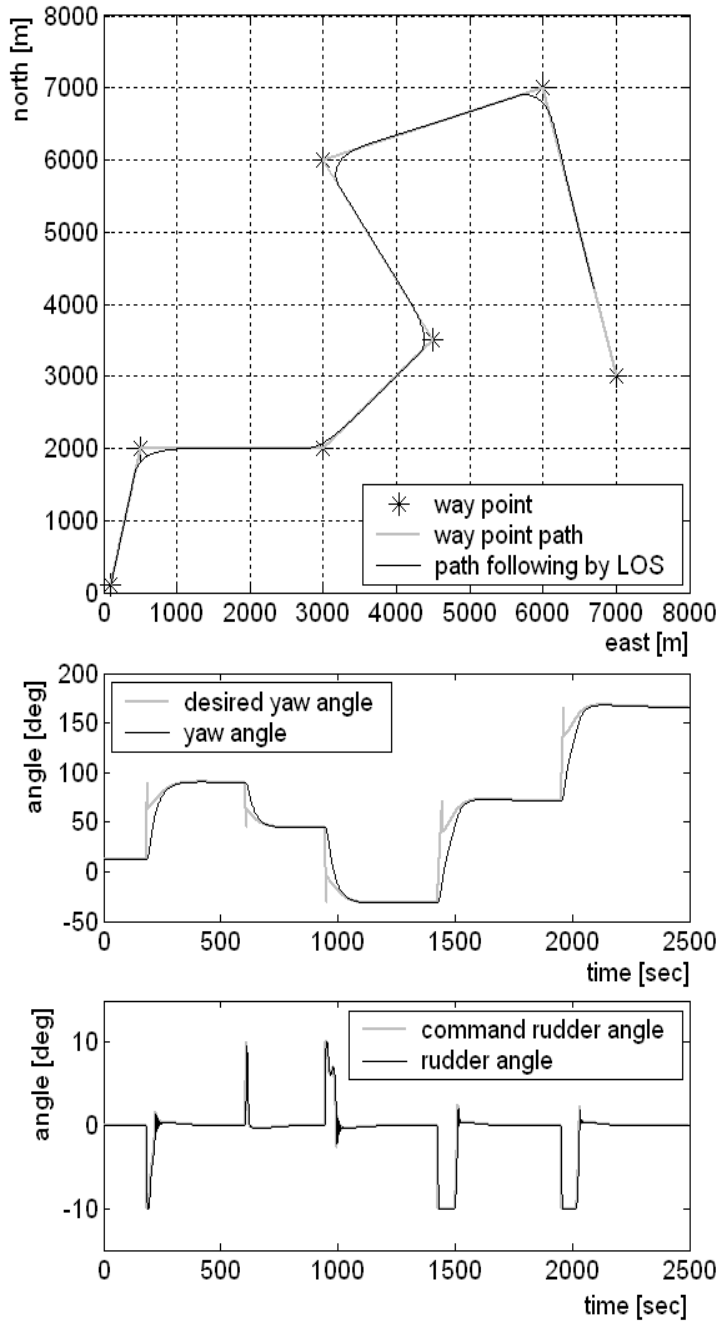


그림 5.31 천해역 항로 추종 시뮬레이션 결과 (fuzzy PID controller)

Fig. 5.31 Simulation result for path following at shallow water(fuzzy PID controller)

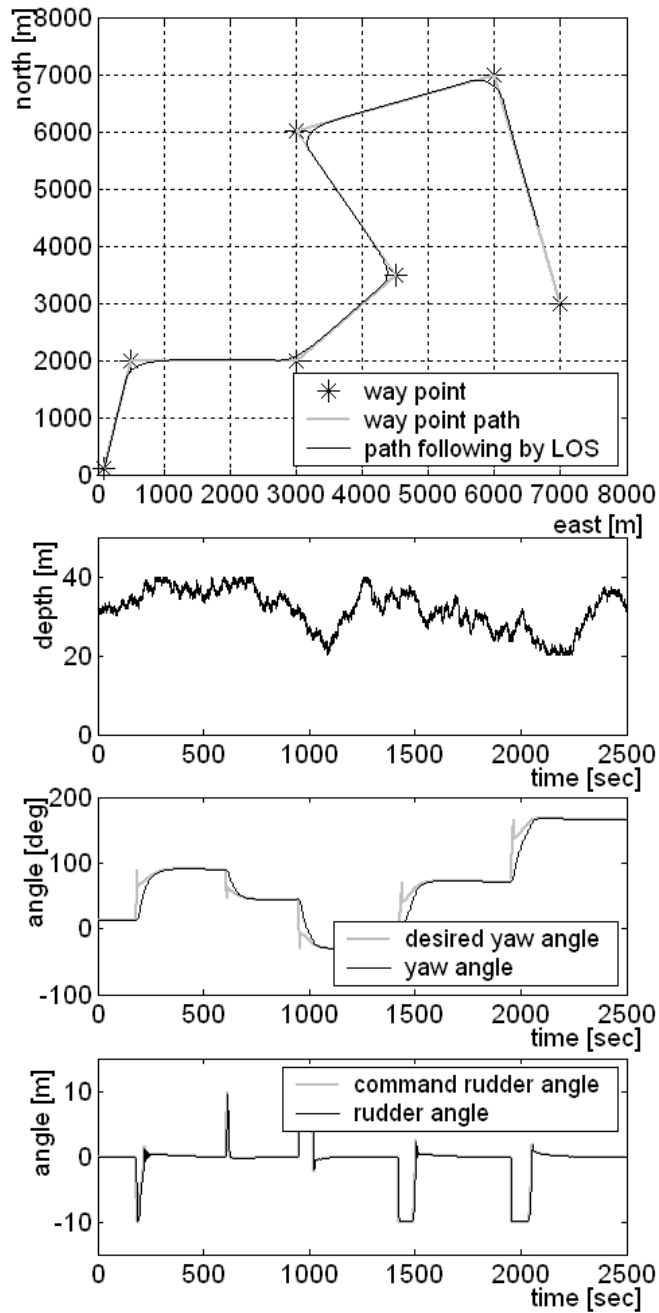


그림 5.32 수심이 변화하는 경우의 오일탱커에 대한 항로 추종 시뮬레이션 결과
 Fig. 5.32 Simulation result for path following of an oil tanker in case of depth-variation

제 6 장 결 론

본 논문은 주 프로펠러와 조타기를 갖는 일반적인 선박의 항법유도제어 시스템이 갖추어야 할 온라인 항로 생성을 위한 항로 결정 알고리즘, 전자해도를 이용한 항로 추종제어를 위한 LOS가이던스 시스템, 비선형 보상능력과 개인 스케줄링 기능을 갖는 퍼지 PID제어기에 기반한 오토파일럿 시스템을 제안하고 비선형 선박 모델을 대상으로 항로 추종제어 시뮬레이션을 종합적으로 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 모폴로지 기법인 세션화연산을 전자해도에 적용함으로써 항해 가능한 영역의 정보를 선분으로 추출할 수 있었고, 추출한 세션화 정보를 이용하여 항로결정 알고리즘을 구현함으로써 골이나 사점에 빠지지 않고 복잡한 지형에서도 강인하게 변침점 형태의 항로를 결정할 수 있었다. 세션화 영상과 인접한 블록 다각형을 분할하는 방법을 고찰하여 항로결정 문제를 경계선분의 한 점을 결정하는 문제로 변환하고 유전 알고리즘을 이용하여 최소거리와 추진 에너지 손실량을 최소화하는 변침점을 구함으로써 항로를 최적화할 수 있었다.
2. LOS 가이던스 규칙을 직선항로에서 선박의 속도와 위치오차에 대한 함수로 유도하고, 선회항로에서 선회 각속도에 대한 함수로 유도함으로써 직선과 선회항로를 추종하도록 유도하는 가이던스 시스템을 구성하였고 항로 추종 시뮬레이션을 실시하여 그 유효성을 확인할 수 있었다. 특히, 해류와 같은 외란이 존재하는 바다를 항행하는 선박에 대하여 유전 알고리즘을 이용하여 직선 항로 LOS 가이던스 시스템의 파라미터를 최적화하고, 최적화된 가이던스 시

시스템을 적용하여 시뮬레이션을 실시한 결과 연안 항해 시에는 정해진 수직 오차 범위 내에서 선박이 운항되도록 유도하고, 대양 항해시에는 추진 에너지 손실을 최소화하도록 선박을 유도함을 확인할 수 있었다.

3. 비선형 선박 모델에 대한 항로 추종 시뮬레이션을 실시하기 위해 비선형 보상능력과 계인 스케줄링 기능을 갖는 퍼지 PID제어기에 기반한 오토파일럿 시스템을 도입하였다. 시뮬레이션 결과 실제 선박과 유사한 비선형 선박모델에 대해서도 제안한 LOS 가이드 시스템이 정해진 항로를 정확하게 추종하도록 유도함을 확인할 수 있었다. 특히, 퍼지 PID제어기는 정상상태 오차를 발생시키지 않고, 수심 변화에 대해 강인한 성능을 발휘할 뿐만 아니라 특히, 천해역에서 빠른 응답이 가능하여 연안항해 시 빈번히 발생하는 충돌 회피나 장애물 회피 등에 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

이상의 연구를 통하여 오토파일럿 시스템과 GPS를 장착한 일반적인 선박의 자동 운항 가능성을 확인하였다. 앞으로의 연구는 제안된 항로 결정 알고리즘을 SENC와 연동하여 ECDIS상에서 구현하는 문제와 LOS 가이드 시스템, 퍼지 PID제어기에 기반한 오토파일럿 시스템 등을 실제의 선박에 적용하여 실험하는 것이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- [1] E. Sperry, "Directional Stability of Automatically Steered Bodies," Journal of the American Society of Naval Engineers, Vol. 42, No. 2, 1922.
- [2] Minorsky, "Automatic Steering," the 13th meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1922.
- [3] T. I. Fossen, "Recent Development in Ship Control Systems Design," World superyacht Review, Sterling Publication Limited, 1999.
- [4] C. L. Lin and H. W. Su, "Intelligent Control Theory in Guidance and Control System Design : an Overview," Proceedings National Science Council ROC(A), Vol. 24 No. 1, pp. 115~20, 2000.
- [5] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [6] T. I. Fossen, *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics, 2002.
- [7] A. H. Lewantowicz, "Architectures and GPS / INS Integration : Impact on Mission Accomplishment," IEEE Position, Location and Navigation Symposium, pp. 284~289, 1992.
- [8] B. Vik, A. Shiriaev and T. I. Fossen, "Nonlinear observer design for integration of DGPS and INS," New directions in Nonlinear observer design, Springer-Verlag Ltd., 1999.
- [9] B. Vik and T. I. Fossen "Nonlinear Observer Design for Integration of GPS and Inertial Navigation Systems," Proceedings of the IEEE CDC, pp. 2956-2961, 2001.
- [10] B. Vik and T. I. Fossen "A Nonlinear Observer for Integration of GPS and Inertial Navigation Systems," Modeling, Identification and Control, pp. 193-208, 2001.

- [11] R. S. Burns, G. Blackwell, and S. Calvert, "An automatic guidance, navigation and collision avoidance system for ships at sea," IEE Colloquium on Control in the Marine Industry, pp. 3/1 ~ 3/3, 1988.
- [12] X. Hong, C. J. Harris, and P. A. Wilson, "Autonomous ship collision free trajectory navigation and control algorithm," Proceeding 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA '99, Vol. 2, pp. 923 ~ 929, 1999.
- [13] T. W. Vaneck, "Fuzzy guidance controller for an autonomous boat," IEEE control Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 43~51, 1997.
- [14] R. Smierzchalski, "Trajectory Planning for Collision situations at Sea by Evolutionary Computation," IFAC Maneuvering and Control of Marine Craft, 1997.
- [15] S. Berge, K. ohtsu, and T. Fossen, "Nonlinear control of ships minimizing the position tracking errors," Modeling Identification Control, Vol. 20, pp. 141-147, 1999.
- [16] P. Encarnaco, A. Pascoal, and M. Arca, "Path following for automous marine craft," Proceedings of 5th IFAC conference Manoeuvering Control Marine Craft, pp. 117~122, 2000.
- [17] K. Y. Petterson and E. Lefeber, "Way-point tracking control of ships," Proceedings of the 40th IEEE CDC, 2001.
- [18] E. Lefeber, K. Y. Pettersen and H. Nijmeijer, "Tracking control of an Underactuated ships," IEEE Transction on Control Systems Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 52~61, 2003.
- [19] R. Satun and G. N. Roberts, "Approaches to Fuzzy Autopilot Design Optimization," Proceedings of the 4th IFAC confrence on

- Maneuvering and Control of Marine Craft, pp. 77~82, 1997.
- [20] G. E. Hearn, Y. Zhang and P. Sen "Alternative Designs of Neural Network Based Autopilots : A Comparative study," Proceedings of the 4th IFAC confrence on Maneuvering and Control of Marine Craft, pp. 83~88, 1997.
- [21] 서상현, 송용규, "Auto-pilot 시스템에 적용되는 제어 알고리즘에 대하여," 대한 조선학회 논문집, Vol. 31, No. 2, 1994.
- [22] 광문규, 서상현, 공인영, "신경망을 이용한 선박용 자동 조타 장치의 제어시스템 설계 연구," 1995년도 대한 조선학회 추계 연구발표회, 1995.
- [23] K. E. Husa and T. I. Fossen, "Backstepping Designs for Nonlinear Way-Point Tracking of Ships," Proceedings of the 4th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, 1997.
- [24] 이병결, 김종화, "선박 자동항로 추적을 위한 회두각 명령의 생성과 적응 퍼지제어," 박용기관학회지, Vol. 25, No. 1, pp. 199~208, 2001.
- [25] 이병결, 김종화, "적응 퍼지 방식을 이용한 선박 자동 항로 추적제어에 관한 연구," Proceedings of the 14th Korea Automatic Control Conference, 1999.
- [26] H. Yamato, H. Uetsuki and T. Koyama, "Automatic Berthing by the Neural Controller," Proceedings of the 9th SCSS, Vol. 2, 1990.
- [27] K. Hasegawa and K. Kitera, "Mathematical Model of Maneuverability at Low Advance Speed and its Application to Berthing Control," Proceedings of the 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, pp. 144~153, 1993.
- [28] Y. A. Kasabeh, M. M. Pourzanjani and M. J. Dove, "The Navigational Problems In Auto-pilot Design for Automatic Berthing of Ships," Proceedings of the 10th Ship Control System

- Symposium, pp. 3-79~3-106, 1993.
- [29] 구자윤, 이철영, "선박 접이안의 퍼지학습 제어," 한국항해학회지 Vol. 18, No. 2, pp. 61~68, 1994.
- [30] T. I. Fossen, S. I. Sagatun and A. J. SΦresen, "Design of Dynamic Positioning System Using Model-Based Control," Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Control Application in Marine Systems, pp. 16~26, 1995.
- [31] 하희천, "전자해도를 이용한 최적 항로 결정 시스템에 관한 연구," 공학석사 학위논문, 한국해양대학교, 1997.
- [32] 이병결, 김종화, 김대영, 김태훈, "유전 알고리즘을 이용한 선박의 최적 항로 결정에 관한 연구," Proceedings of the 15th Korea Automatic Control Conference, 2000.
- [33] M. White, "Car Navigation Systems," Geographical Information Systems : Principles and Applications, Vol. 2, pp. 115~125, 1991.
- [34] T. Kitamura, M. Kobayashi and T. Takeuchi, " The dynamic route guidance systems of UTMS," Proceedings of the 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems 95 YOKOHAMA, pp. 610~615, 1995.
- [35] K. Sugihara, "GA-based on-line path planning for SAUVIM," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1416, pp. 329~338, Springer-Verlag, 1998.
- [36] G. K. H. Pang, K. Takahashi, T. Yokota and H. Takenaga, "Adaptive Route Selection for Dynamic Route Guidance System Based on Fuzzy-Neural Approaches," IEEE Transactions on Vehicle Technology, Vol. 48, No. 6, pp. 2028~2039, 1999.
- [37] J. A. McHugh, *Algorithmic Graph Theory*, Prentice-Hill International, INC., 1990.

- [38] M. Breivik and T. I. Fossen, "Line-of-Sight Path Following for Marine Surface Vessels," Proceedings of the IFAC, 2004.
- [39] 이병결, 김중화, 유영호, 오세준, "선박의 항로 추종을 위한 LOS 가이드 시스템," Proceedings of the KOSME 2004 Autumn Conference, pp. 179~184, 2004.
- [40] I. Ha and S. Chong, "Design of a CLOS guidance law via feedback linearization," IEEE Transactions on Aero-space and Electronic Systems, Vol. 28 No. 1, pp. 51~63, 1992.
- [41] 西谷芳雄, *Compassと自動操舵*, 成山堂書店, 1988.
- [42] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley Longman, 1992.
- [43] SNAME, The Society of Naval Architecture and Marine Engineers, Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid, Technical and Research Bulletin No. 1~5, 1950.
- [44] J. H. Newman, *Marine Hydrodynamics*, MIT press, 1977.
- [45] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture (2nd Revision)*, The Society of Naval Architects and Marine Avenue, 1989.
- [46] J. L. Meriam and L. G. Kraige, *Engineering Mechanics : Dynamics*, 4th edition, John Wiley & Sons, INC., 1998.
- [47] T. I. Fossen, "Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicle," Ph. D thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University, 1991.
- [48] O. M. Faltinsen, *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge University Press, 1991.
- [49] M. Blanke, "A Ship Propulsion Losses Related to Automated Steering and Prime Mover Control," Ph. D. thesis, The Technical University of Denmark Lyngby, 1981.

- [50] 대한조선학회 편, *선박 계산*, 동명사, 2002.
- [51] K. S. M. Dvidson and L. I. Schiff, "Turning and Course Keeping Qualities," Transactions of SNAME, vol. 54, 1946.
- [52] K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano, "On the Steering Qualities of Ships," Technical report, International Shipbuilding Progress, vol. 4, 1957.
- [53] IMO, "Draft Guideline for ECS," NAV. 44/7/4, 1998.
- [54] ISO, "ECS Standard(Draft) 19379," 2001.
- [55] RTCM, "Recommended Standard for ECS(Draft version 3.0)," paper 83, 2002.
- [56] International Hydrographic Bureau, IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data, Edition 3.1, 2000.
- [57] M. B. Brown, "Developments in the NOAA Electronic Navigational Chart program," NOAA, Office of Coast Survey, Marine chart division, U.S. Hydrographic Conference, 1999.
- [58] S. J. Chang, "Design and Preliminary Test on the Integration of Weather Data in ECDIS for Marine Navigation," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 9, No. 1, pp.21~24, 2001.
- [59] 장동혁, *디지털 영상 처리의 구현*, PC 어드밴스, 1999.
- [60] T. Y. Zhang and C. Y. Suen, "A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns," Comm of the ACM, vol. 27, No. 3, pp. 236~239, 1984.
- [61] L. Lam, S. L. Lee, C. Y. Suen, "Thinning Methodologies - A Comprehensive Survey," IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 9, pp. 869~885, 1992.
- [62] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Co. Inc., N.Y., 1989.

- [63] H. E. Lu, P. S. P. Wang, "An improved fast parallel thinning algorithm for digital patterns," Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 364~367, 1985.
- [64] N. Chuei, T. Y. Zhang, and C. Y. Suen, "New algorithm for thinning binary image and Chinese character," Computer processing of Chinese Oriental languages, Vol. 2, No. 3, pp. 169~179, 1986.
- [65] Z. Michaelwicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.
- [66] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1997.
- [67] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000.
- [68] M. Breivik and T. I. Fossen, "Path Following of Straight Lines and Circles for Marine Surface Vessels," Proceeding of the IFAC CAMS, 2004.
- [69] M. Breivik and T. I. Fossen, "Path Following for Marine Surface Vessels," Proceeding of the Oceans, 2004.
- [70] 이병걸, 정경열, 김종화, "선박 자동 항로 추종 제어 알고리즘에 관한 연구," 박용기관학회지, Vol. 22, No. 6, pp. 920~928, 1998.
- [71] K. Nomoto, et al., "Loss of Propulsive Power caused by Yawing with Particular Reference to Automatic steering," Journal of the society of naval architects of japan, Vol. 120, 1966.
- [72] T. Koyama, "On the Optimum Automatic Steering System of ships at Sea," Journal of the society of naval architects of Japan, Vol. 122, 1967.
- [73] K. Hasegawa, "On the Performance Criterion of Autopilot Navigation," Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 178, 1980.

- [74] T. I. Fossen, J. P. Strand, "Nonlinear Ship Control," IFAC Conference Applications in Marine Systems, 1998.
- [75] M. J. Dove and C. B. Wright, "Development of marine autopilots," Computer methods in marine and offshore engineering, pp. 259~272, 1991.
- [76] Y. M. Enab, "Intelligent controller design for the ship steering problem," IEE Proceedings Control theory & Applications, Vol. 143, No. 1, pp. 17~24, 1996.
- [77] S. B. Lee, I. Kim, "A ship automatic navigation in dynamic environment using artificial intelligence," Proceeding of the 4th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies, Vol. 1, pp. 418~422, 2000.
- [78] J. H. Kim, "A Suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol. 5, No. 4, pp. 87~100, 1995.
- [79] 박장호, "퍼지 PID 제어기의 성능개선과 비선형 유압실린더 위치제어에의 응용," 한국해양대학교 碩士論文, 2001.
- [80] 김인환, 이병결, 김종화, "비선형 퍼지 PID제어기의 성능 개선에 관한 연구," 한국박용기관학회 논문지, Vol. 27, No. 7, pp. 852~661, 2003.
- [81] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, 1997.
- [82] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison Wesley, 1999.
- [83] C. A. Desoer and M. Vidyasagar, *Feedback Systems: Input-Output Properties*, New York Academic, 1975.
- [84] R. J. P. de Figueiredo and G. Chen, *Nonlinear Feedback Control Systems: An Operator Approach*, New York Academic, 1993.
- [85] A. Heidar, M. H. Li and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional- Derivative Control Systems," IEEE

- Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 245~254, 1994.
- [86] G. Chen and H. Ying. "Stability Analysis of Nonlinear Fuzzy PI Control Systems," Proceeding of 3rd International Conference on Fuzzy Logic Application, pp. 128~133, 1993.
- [87] 이병결, 김종화, 진강규, 류길수, "퍼지 PID제어기의 안정도 분석," Proceedings of the KOSME 2004 Autumn conference, pp. 207~216, 2004.
- [88] B. K. Lee, I. H. Kim and J. H. Kim, "Stability Analysis and Proposal of a Simple Form of a Fuzzy PID Controller," Journal of the Korea Society of Marine Engineer, Vol. 28, No. 8, pp. 1299~1312, 2004.
- [89] 이병결, 김인환, 김종화, "고정 파라미터를 갖는 단순화된 퍼지 PID 제어기의 제안과 안정도 분석," 퍼지 및 지능시스템 학회 논문지, Vol. 14, No. 7, pp. 807~815, 2004.
- [90] M. S. Chislett and J. Strøm-Tejsen, "Plannar Motion Mechanism Tests and Full-scale Steering and Maneuvering Predictions for a Mariner Class Vessel," Technical Report, Lyngby Denmark, 1965.
- [91] N. H. Norbin, "Theory and Observation on the Use of a Mathematical Model for Ship Maneuverity in deep and confined waters," 8th Symposium on Naval Hydro-dynamics, California, 1970.

감사의 말씀

모든 환경과 사람들을 통하여 역사하시는 하나님께 감사를 드립니다.

학부과정에서 학위과정까지 한결같은 사랑과 세심한 배려로 훌륭한 가르침을 주신 지도교수 김종화 교수님께 머리숙여 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 자상한 관심과 열의로 세밀한 검토를 해주신 진강규 교수님, 류길수 교수님, 유영호 교수님, 오세준 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 깊은 관심 속에 지속적인 가르침을 주신 조석제 교수님, 황승욱 교수님, 하운수 교수님께도 감사를 드립니다.

학위 과정중에 많은 도움을 주신 김인환 교수님과 지능제어연구실의 서승원, 이한, 김태훈, 김대영, 안정훈, 김진규, 박장호, 류기석, 최효식, 임종욱, 임재권 학우님께 감사의 마음을 전합니다. 학부 사무실의 강군호 조교와 김경언 조교님, 대학원 과정의 길을 같이 해온, 김영일, 유강주 학우님께도 감사의 마음을 전합니다.

대학에 들어와서 만났지만 평생의 친구인 박규범, 엄운호, 정태원, 김정훈, 임기택과 어렵지만 자신의 길을 가려는 손동식, 송용권님께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

부족한 형이자 오빠를 묵묵히 지켜봐 준 동생 병전이와 미혜, 3년여의 세월을 함께 해온 경은이에게 감사의 마음을 전합니다. 마지막으로 기도와 사랑으로 돌봐주시고 키워주신 하늘나라에 계신 아버님과 고향에 계신 어머님께 이 논문을 바칩니다.

2005년 1월 이 병 결 올림