

工學碩士 學位論文

2축2타선박을 고려한 선박조종
시뮬레이터의 시스템 구축에 관한 연구

Study on System Configuration of Ship-handling Simulator
with Consideration of Twin-propeller and Twin-rudder Ship

指導教授 孫 景 浩

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科 金 容 敏

本 論 文 을 金 容 敏 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 박 주 용 인

위 원 박 석 주 인

위 원 손 경 호 인

2002년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과 김 용 민

목 차

Abstract	III
Nomenclature	IV
List of Figures	VIII
List of Tables	X
1. 서 론	1
2. 2축2타선박의 조종운동 수학모델	3
2.1 조종운동방정식	3
2.2 주선체에 작용하는 유체력	6
2.3 프로펠러에 기인하는 유체력	8
2.4 조타에 기인하는 유체력	12
2.5 풍압력과 예향력	15
2.6 주기관 회전수 및 조타기의 응답 모델	17
3. 조종성능의 확인	18
4. 시스템 구성과 역할	25
4.1 시스템 구성	25
4.2 구성요소들의 기능과 역할	28
4.2.1 운동계산부	28
4.2.2 제어입력부	29
4.2.3 항해정보출력부	30
4.2.4 3차원시계재현부	31
4.2.5 2차원조감도	32
4.2.6 Instructor's Console	33

5. 3차원 모델링과 실시간 VR(Virtual Reality) 시뮬레이션	34
6. 실시간 시뮬레이션 예	38
7. 결 론	42
참고문헌	43

Abstract

Ship-handling simulator has been widely utilized for various purposes such as training mariners, safety assessment, waterway design, manoeuvrability analysis of new ship at her planning stage and so on. According to the recent diversification of ship and the rapid growth of her size, a database which can cover various ships is requested for manoeuvring simulation with ship-handling simulator.

This paper purposes to configurate ship-handling simulator with a database system on various ships.

As a kind of ship to be applied, twin-screw and twin-rudder ship which has been build recently for the reason of high propulsion efficiency was adapted. Mathematical model of manoeuvring motions for twin-screw and twin-rudder ship was discussed from the viewpoint of hull damping forces at low advanced speed and interaction between hull, propeller and rudder. Using this model, manoeuvring motion of twin-screw and twin-propeller ship was simulated numerically and her principal manoeuvrability was examined. Creating and adding classes related with this model made it possible to configurate of ship-handling simulator considered twin-screw and twin-rudder ship. Also several applications on twin-screw and twin-propeller ship were programmed by C++ language. Finally, a real time simulation of berthing manoeuvre with twin-screw and twin-rudder ship in Pusan Harbor was accomplished by the present simulator.

Through the above study, ship-handling simulator considered many kinds of ship as well as twin-screw and twin-propeller ship could be configurated, and simulator techniques for developing full mission simulator were accumulated.

Nomenclature

A_j	Coefficients given by Isherwood
A_L	Lateral projected area above water plane of a ship
A_R	Submerged area of rudder
A_T	Transverse projected area above water plane of a ship
A_{SS}	Lateral projected area of superstructure
$A(k)$	Fourier coefficients
a_H	Ratio of lateral force acting on a hull by rudder to rudder normal force
B_j	Coefficients given by Isherwood
$B(k)$	Fourier coefficients
b_p	Distance between two propellers
b_R	Distance between two rudders
C	Distance from bow of centroid of lateral projected area
C_j	Coefficients given by Isherwood
C_N	Coefficient of wind-induced yaw moment about the midship
C_T^*	Thrust coefficient on four quadrants
C_X	Coefficient of longitudinal component of wind-induced force
C_Y	Coefficient of lateral component of wind-induced force
D	Propeller diameter
d	Mean draft
F_N	Rudder normal force
f_a	Gradient of rudder normal force against attack angle in open water
H_R	Rudder height
I_{zz}	Moment of inertia about the z axis
J	Advance ratio
J_{zz}	Added moment of inertia about the z axis
L	Length between perpendiculars of ship
L_{OA}	Length overall
K_T	Thrust coefficient on the only first quadrant
l_a	Distance from midship to applied position of stern tug force
l_f	Distance from midship to applied position of bow tug force

l_R	Distance from the center of gravity to rudder
M	Number of distinct groups of masts or kingposts seen in lateral projection
m	Mass of ship
m_x	Added mass in the x direction
m_y	Added mass in the y direction
N	Yaw moment
N_H	Yaw moment acting on a hull
N_P	Yaw moment induced by propellers
N_R	Yaw moment induced by rudders
N_T	Yaw moment induced by tug
N_W	Yaw moment induced by wind
$\triangle N_P$	Asymmetrical yaw moment acting on a hull by reversing rotation of propellers
n	Number of propeller revolution per second
n_i	Number of propeller revolution per second in propeller idling
n^*	Ordered n through the main engine telegraph
P	Propeller pitch
(p)	Port side
r	Angular velocity
S	Length of perimeter of lateral projection of vessel excluding waterline and slender bodies such as masts and ventilaters
s	Slip ratio of propeller
(s)	Starboard side
T	Propeller thrust
T_E	The time constant of the steering gear
T_M	The time constant of main engine
t	Thrust deduction factor
t_R	Ratio of lateral force acting on a hull by rudder to rudder normal force
u	Longitudinal component of ship velocity
u_A	Longitudinal component of relative wind velocity
u_P	Longitudinal component of inflow velocity to propeller
u_R	Longitudinal component of effective inflow velocity to rudder
u^*	Longitudinal component of absolute ship velocity

V	Resultant ship speed
V_A	Relative wind velocity
V_C	Current velocity
V_R	Effective inflow velocity to rudder
V_W	Wind velocity
v	Lateral component of ship velocity
v_A	Lateral component of relative wind velocity
v_P	Lateral velocity of ship at propeller position
v_R	Lateral component of effective inflow velocity to rudder
v^*	Lateral component of absolute ship velocity
v_P^*	Value of v_P at minimum of $(1 - w_P)$
w_P	Wake fraction at propeller position
w_{P0}	Wake fraction at propeller position in straight forward running
w_R	Wake fraction at rudder position
w_{R0}	Wake fraction at rudder position in straight forward running
X	Surge force
X_H	Surge force acting on a hull
X_P	Surge force induced by propellers
X_R	Surge force induced by rudders
X_T	Surge force induced by tug
X_W	Surge force induced by wind
x_G	x coordinate of center of gravity
x_H	x coordinate of center of lateral force induced on hull by rudder interaction
x_P	x coordinate of propeller position
x_R	x coordinate of rudder position
Y	Sway force
Y_H	Sway force acting on a hull
Y_P	Sway force induced by propellers
Y_R	Sway force induced by rudders
Y_T	Sway force induced by tug
Y_W	Sway force induced by wind
$\triangle Y_P$	Asymmetrical sway force acting on a hull by reversing rotation of propellers

y_P	y coordinate of propeller position
y_R	y coordinate of rudder position

Greeks

α	x coordinate of center of m_y
α_R	Effective inflow angle to rudder
β	Drift angle
β_R	Geometric drift angle at rudder position
δ	Rudder angle
δ_R	Rudder angle at rudder normal force zero
$\dot{\delta}_{\max}$	Maximum rudder angle speed
δ^*	Ordered rudder angle through steering wheel
ε	$(1 - w_R) / (1 - w_P)$
η	D / H_R
θ	Hydrodynamic pitch angle of propeller
κ	$0.6 / \varepsilon$
ρ	Density of water
ρ_A	Density of air
ψ	Heading angle
ψ_A	Relative wind angle
ψ_C	Current angle
ψ_W	Wind angle
$\dot{}$	Time derivative
\prime	Non-dimensional sign

List of Figures

Fig. 1	Coordinate system for ship manoeuvring motion	3
Fig. 2	$(1 - w_p)$ for port and starboard propeller	10
Fig. 3	Thrust coefficient C_T^* for B5-75 screw with $P/D = 1.0$ by for-quadrant measurement in open water	11
Fig. 4	Thrust coefficient K_T for B5-73 screw with $P/D = 1.055$	11
Fig. 5	δ_R for port and starboard rudder	14
Fig. 6	Towing arrangements	16
Fig. 7	Conventional turn	20
Fig. 8	$10^\circ/10^\circ$ Zigzag maneuver	20
Fig. 9	Turning characteristics	21
Fig. 10	Accelerating turn	21
Fig. 11	Coasting turn	22
Fig. 12	Stopping distance	22
Fig. 13	Stopping time	23
Fig. 14	Simulation on turning operation by both bow and stern tugs by both bow and stern tugs	23
Fig. 15	Simulation on lateral shifting operation by both bow and stern tugs	24
Fig. 16	Schematic diagram for realization of ship-handling simulator	25
Fig. 17	System composition of present ship-handling simulator	26
Fig. 18	Class composition of Ship Dynamics Calculation	28
Fig. 19	Screen of Operation Panels for twin-screw and twin-rudder ship	29
Fig. 20	Screen of Navigational Indicators	30
Fig. 21	Visual field of 3D Bridge View	31
Fig. 22	Screen of 2D Bird's Eye View	32
Fig. 23	Database format on Instructor's Console	33
Fig. 24	Image generation procedure for geographical features and ship	34
Fig. 25	Coastal Line of Pusan Harbor model	36
Fig. 26	3D Image of Pusan Harbor model	36
Fig. 27	Hierarchical visual database of Pusan Harbor model	37

Fig. 28	3D image and hierarchical visual database of ship model	37
Fig. 29	Captured 3D view seen from bridge of the ship at the position near breakwaters of Pusan Harbour entrance, where the pilot gets on board ship	39
Fig. 30	Bridge view of meeting with target-ship on the passage of Pusan Harbour	39
Fig. 31	Bridge view of mooring at Chasongdae Container Wharf of Pusan Port	40
Fig. 32	2D Display of tracks of ownship during berthing manoeuvre	40
Fig. 33	Time histories of motion parameters of ownship during berthing manoeuvre	41

List of Tables

Table. 1	Principal dimensions of Twin-propeller Twin-rudder ship	18
Table. 2	External environmental condition	38

1. 서 론

최근에 선박의 대형화, 고속화 추세에 따라 선박 운항 환경은 점점 나빠지고 있으며 이러한 항행안전의 문제를 해결하기 위하여 우수한 조종성능을 갖는 선박에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 선박의 조종 안전성, 특히 항만 내에서의 입·출항 조종 안전성은 단순히 선박의 조종성능만으로는 평가될 수 없으며 인간의 능력과 환경요인을 함께 고려할 필요가 있다. 따라서 선박, 인간 그리고 환경 3요소간의 조합에 의한 조종 안전성 평가가 이루어져야 하며 이에 대해서 선박조종시뮬레이터(Real-time Ship-handling Simulator)를 이용하는 것이 가장 적절한 방법으로 인식되고 있다.

선박조종시뮬레이터는 해기사의 교육 훈련, 항만 수로 설계 시 안전성 평가 그리고 선박설계 시 조종성능의 검토 등으로 널리 사용되고 있다. 이러한 선박조종시뮬레이터는 IMSF(International Marine Simulator Forum)의 제안에 따라 Full Mission, Multi Task, Limited Task, Single Task의 4가지 형태로 분류되며 그 규모와 성능은 다르지만 각기 특징과 용도를 가지고 있다[1]. 여러 교육기관 및 연구기관에서 이러한 선박조종시뮬레이터를 도입하여 활용하고 있으며, 또한 더욱 효과적인 시스템을 구축하기 위하여 연구·개발을 하고 있다.

선박조종시뮬레이터에 의한 조선(操船)에서는 선박특성(조종성능, 선종, 선형 등)과 환경특성(항만, 자연환경 등)을 변화시키는 것이 가능하다. 임의의 상황에 따라 선박과 항만 그리고 자연환경요소를 변화시킴으로써 다양한 조종시뮬레이션을 수행할 수 있다. 따라서 여러 선박들과 항만들에 대한 데이터베이스(Database)는 선박조종시뮬레이터의 구축에 있어서 필수적이라고 할 수 있으며, 특히 다양화되고 있는 선박에 대해서는 선종에 따른 수학적모델을 각각 선박조종시뮬레이터에 적용해야 할 필요가 있다.

우수한 추진성능을 목적으로 하는 특수선형 중에 2축2타선박의 조종운동 수학적모델에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 항만 내에서의 즉, 저속시 2축2타선박의 조종특성에 대해서는 1축1타선박에 비해 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 항만 내에서의 조종운동은 일반적인 대양 항해시의 조종운동과는 달리 선박은 큰 사향각을 가지고 저속운동을 하며 수심의 영향과 바람, 조류 등 외력의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 특징이 있다. 또한 다른 선박과의 충돌을 피하고 접·이안을 하기 위하여 가속, 감속, 정지, 후진 등의 다양한 운동상태를 보이며 예선을 사용하기도 한다. 그리고 2축2타선박의 선체·프로펠러·타의 상호간섭은 1축1타선박에 비해 현저하게 다른 경향을 나타내고 있다. 따라서 MMG모델[2]을 사용하여 선박의 조종운동을 추정하는 경우에 있어서 선체·프로펠러·타의 단독성능과 함께 각각의 상호간섭의 취급 및 표현은 중요한 요소이다.

본 논문에서는 항만 내에서의 조종운동과 2축2타선박의 조종특성을 고려한 수학모델에 대하여 논의하기로 한다. 구체적으로, 저속시 2축2타선박의 선체에 작용하는 유체력에 대해서 검토하고 선체·프로펠러·타의 상호간섭을 고려하였다. 그리고 수치시물레이션을 수행하여 2축2타선박의 기본적인 조종성능을 확인하였다.

본 논문에서는 2축2타선박의 조종운동 수학모델을 선박조종시물레이터에 적용시켜 활용할 수 있도록 하였다. 기존 프로그램에 클래스(Class)들을 추가함으로써 2축2타선박의 조종운동 수학모델을 적용할 수 있었다. 그리고 본 선박조종시물레이터를 부산항에 적용하여 운용함으로써 실제 조종시물레이션에 활용할 수 있음을 확인하였다.

2. 2축2타선박의 조종운동 수학모델

2.1 조종운동방정식

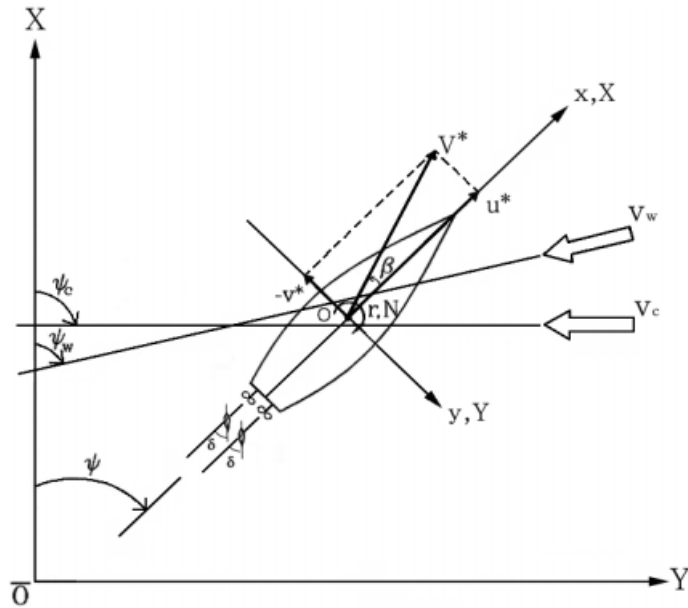


Fig. 1 Coordinate system for ship manoeuvring motion

일반적으로 선박의 조종운동방정식은 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)의 복합운동으로 표현할 수 있다. Fig. 1과 같이 선체중양(midship)에 좌표 원점을 둔 동좌표계(moving axes system)를 $O-xyz$ 라 할 때, 평수 중에서의 조종운동의 기본 방정식은 다음과 같이 표시된다[3].

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X \\
 m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\
 I_{zz} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 m 은 선체의 질량이고, I_{zz} 는 z 축 주위의 관성모멘트이다. u , v , r 은 각

각 선체중양에서의 x 축 방향 속도성분, y 축 방향 속도성분, z 축 주위의 각속도성분이다. \dot{u} , \dot{v} , \dot{r} 는 각각 u , v , r 의 시간에 대한 도함수이고, x_G 는 무게중심의 x 좌표이다. X , Y , N 은 각각 x , y 축 방향 유체력과, z 축 주위의 유체력 모멘트이다.

식(1)의 유체력 중 부가질량력[4]을 좌변에 고려하고, 우변에는 부가질량력을 제외한 유체력으로서 MMG모델[2]을 적용하면 조종운동 수학모델은 다음과 같이 표시된다. 단, 관례에 따라 Munk 모멘트 등 일부 부가질량력은 우변의 유체력항에 포함시킨다.

$$\begin{aligned}
& (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y)vr - (mx_G + m_y\alpha)r^2 \\
& = X_H + X_P + X_R + X_T + X_W \\
& (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x)ur + (mx_G + m_y\alpha) \dot{r} \\
& = Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_W \\
& (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} + (mx_G + m_y\alpha) \dot{v} + mx_Gur \\
& = N_H + N_P + N_R + N_T + N_W
\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 첨자 H , P , R , T , W 는 각각 주선체, 프로펠러, 타, 예선 및 바람에 기인하는 유체력 또는 외력 성분을 나타낸다. 그리고 m_x , m_y 는 x , y 축 방향의 부가질량, J_{zz} 는 z 축 방향의 부가관성모멘트, α 는 m_y 중심의 x 좌표를 나타낸다.

한편, 조류에 기인하는 유체력은 별도의 항으로써 고려할 필요없이, 식(2)의 유체력 계산에서 운동 변수로서 상대유속 즉, 대수속도를 사용함으로써 조류의 영향이 포함될 수 있다. 조류의 유속 V_c 와 유향각 ϕ_c 를 Fig. 1과 같이 정의할 때 대수속도와 대지속도의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
u & = u^* + V_c \cos(\phi_c - \phi) \\
v & = v^* + V_c \sin(\phi_c - \phi) \\
\dot{u} & = \dot{u}^* + V_c r \sin(\phi_c - \phi) \\
\dot{v} & = \dot{v}^* - V_c r \cos(\phi_c - \phi)
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서 u^* , v^* , \dot{u}^* , \dot{v}^* 는 대지속도와 가속도를 u , v , \dot{u} , \dot{v} 는 대수속도와 가속도를 나타낸다. 식(3)의 관계를 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) \dot{u}^* &= (m + m_y)vr + (mx_G + m_y\alpha)r^2 \\
 &\quad - (m + m_x)V_c r \sin(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + X_H + X_P + X_R + X_T + X_W \\
 (m + m_y) \dot{v}^* + (mx_G + m_y\alpha) \dot{r} &= - (m + m_x)ur \\
 &\quad + (m + m_y)V_c r \cos(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_W \\
 (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} + (mx_G + m_y\alpha) \dot{v}^* &= - mx_G ur \\
 &\quad + (mx_G + m_y\alpha)V_c r \cos(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + N_H + N_P + N_R + N_T + N_W
 \end{aligned} \tag{4}$$

식(4)로부터 축차근사적분법을 이용하여 대지속도 \dot{u}^* , \dot{v}^* 와 회두각속도 \dot{r} 을 구한 후에, 다시 적분을 수행함으로써 선위(船位)와 회두각을 계산할 수 있다.

2.2 주선체에 작용하는 유체력

항만 내에서의 선박은 큰 사향각을 가지고 저속운동을 하며 가속(accelerating), 감속(decelerating), 정지(stopping), 후진(backing) 등 다양한 모드의 운동을 포함한다. 따라서 항만 내에서 운동하는 선박의 주선체에 작용하는 유체력은 일반적인 대양 항해시의 조종운동 수학모델로서 추정하는 것은 부적합하다. 본 논문에서는 2축2타선박의 주선체에 작용하는 유체력의 저속시 수학모델로서 문헌[5]의 결과를 이용하였으며 다음과 같다.

(1) 선속이 0이 아닌 경우($V \neq 0$)

$$\begin{aligned}
 X_H &= 0.5 \rho L d V^2 \{ X_{uu}' u' |u'| + X_{vr}' v' r' \} \\
 Y_H &= 0.5 \rho L d V^2 \{ Y_v' v' + Y_{wr}' u' r' + Y_{vv}' v' |v'| \\
 &\quad + Y_{vr}' v' |r'| + Y_{wrr}' u' r' |r'| \} \\
 N_H &= 0.5 \rho L^2 d V^2 \{ N_v' v' + N_{wv}' u' v' + N_r' r' \\
 &\quad + N_{vvr}' v'^2 r' + N_{wvr}' u' v' r'^2 + N_{rr}' r' |r'| \}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, L 과 d 는 각각 선체길이(수선간장)와 평균흘수이다. 그리고 운동변수와 유체력의 무차원화 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u', v' &= u, v / V \\
 r' &= r \cdot L / V \\
 X_H', Y_H' &= X_H, Y_H / 0.5 \rho L d V^2 \\
 N_H' &= N_H / 0.5 \rho L^2 d V^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

(2) 선속이 0인 경우($V = 0$)

선속이 0인 경우의 운동은 선박이 그 장소에서 회전운동만 하게 되므로, 이 때 선체에 작용하는 유체력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_H &= 0 \\
Y_H &= 0 \\
N_H &= 0.5 \rho L^4 d N_{rr}' r |r|
\end{aligned}
\tag{7}$$

식 (5), (7)에서의 유체력미계수들은 추정식을 이용하거나 실험을 통하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 Inoue의 추정식[6]을 이용하였으며 Takashina가 수행한 대각도 운동 시의 실험결과[7]로부터 구한 유체력미계수 값들과 비교한 결과 큰 차이가 없음을 확인하였다.

상기 모델은 저속영역에서만 아니라 일반 선속영역에서의 조종운동을 추정하는데 이용될 수 있다. 일반 선속영역일 경우, 즉 $u \gg v$ 인 경우에는 $u' = u/V \approx 1$ 이 되고 식 (5)는 일반 선속영역에서의 수학모델인 Inoue 모델[6]과 일치하게 된다. 그러나 극단적인 후진, 횡이동 등의 경우에는 오차가 있을 것으로 사료되지만, 이 때에는 조종운동으로 인한 선박의 이동량이 작기 때문에 무난할 것으로 생각된다. Hirano는 저속시 조종운동 추정을 위한 수학모델로서 상기 모델과 거의 같은 실용적 모델을 제안하고 있으며[8], Mikelis도 선박의 후진운동 추정을 위한 수학모델로서 거의 유사한 모델을 제안하고 있다[9].

2.3 프로펠러에 기인하는 유체력

2축2타선박의 프로펠러에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 X_P &= (1 - t)(T^{(p)} + T^{(s)}) \\
 Y_P &= \Delta Y_P \approx 0 \\
 N_P &= (1 - t)b_p/2(T^{(p)} - T^{(s)}) + \Delta N_P \\
 &\approx (1 - t)b_p/2(T^{(p)} - T^{(s)})
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 위 첨자 (s), (p)은 각각 우현측(starboard side)과 좌현측(port side)을 나타내고 t 는 추력감소계수, b_p 는 프로펠러간의 거리를 나타낸다. 그리고 ΔY_P 와 ΔN_P 는 프로펠러 회전에 의한 불평형유체력 성분을 나타내며, 2축2타선박에 있어서는 양쪽의 주기관이 동일회전수로 정회전 또는 역회전하는 경우 서로 상쇄되기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다.

따라서 2축2타선박의 프로펠러에 기인하는 유체력은 우현측과 좌현측의 추력을 각각 계산하여 구하면 된다. 각각의 추력은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 다음과 같이 4가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

- ① $u \geq 0$, $n \geq 0$, ② $u \geq 0$, $n \leq 0$
 ③ $u \leq 0$, $n \geq 0$, ④ $u \leq 0$, $n \leq 0$

①,②는 정상적인 전진 상태와 감속 또는 정지 조종 시의 경우를 나타낸다. ③,④는 각각 후진으로부터 전진 방향으로 가속하는 상태와 정상적인 후진 상태를 나타낸다. ①~④와 같이 가속, 감속 및 후진 등의 광범위한 프로펠러 하중도(荷重度)하에서의 프로펠러의 추력은 Fourier급수전개를 이용하여 다음과 같이 표시될 수 있다[10].

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} \rho C_T^* [u_P^2 + (0.7 \pi n D)^2] \frac{1}{4} \pi D^2 \\
 &= \frac{1}{8} \rho \pi D^2 C_T^* [u_P^2 + (0.7 \pi n D)^2]
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
C_T^* &= \sum_{k=0}^{20} [A(k) \cos \theta k + B(k) \sin \theta k] \\
&= A(0) + \sum_{k=1}^{20} [A(k) \cos \theta k + B(k) \sin \theta k]
\end{aligned} \tag{10}$$

$$u_P = u(1 - w_P) \tag{11}$$

여기서 n 은 프로펠러 회전수(rps), D 는 프로펠러 원반의 직경, u_P 는 프로펠러에 유입하는 흐름의 평균속도를 나타낸다. 그리고 w_P 는 프로펠러 위치에서의 유효반류 계수를 의미하여, Lee는 2축2타선박의 $(1 - w_P)$ 에 대해서 다음과 같은 추정식을 제안하고 있다[11].

i) ($u > 0$) 인 경우

$$\begin{aligned}
(1 - w_P)^{(p)} &= 0.6 (v_P' - v_P^*)^2 + (1 - w_{P0}) \\
(1 - w_P)^{(s)} &= 0.6 (v_P' + v_P^*)^2 + (1 - w_{P0}) \\
v_P' &= -\sin \beta + x_P' r' \quad , \quad v_P^* = \left| \frac{y_P}{x_P} \right|
\end{aligned} \tag{12}$$

ii) ($u \leq 0$) 인 경우

$$\begin{aligned}
(1 - w_P)^{(p)} &= 1 \\
(1 - w_P)^{(s)} &= 1
\end{aligned} \tag{13}$$

여기서 v_P' 는 프로펠러 위치에서의 횡방향 유속, x_P' 는 프로펠러 위치의 x 좌표, v_P^* 는 $(1 - w_P)$ 의 값이 최소가 되는 프로펠러 위치에서의 횡방향 유속을 나타내며, w_{P0} 는 정상 직진 시의 w_P 값이다. 그리고 x_P, y_P 는 프로펠러 위치의 x, y 좌표를 나타낸다. Fig. 2는 우현측과 좌현측의 프로펠러 위치에서의 $(1 - w_P)$ 의 값을 보여주고 있다[11].

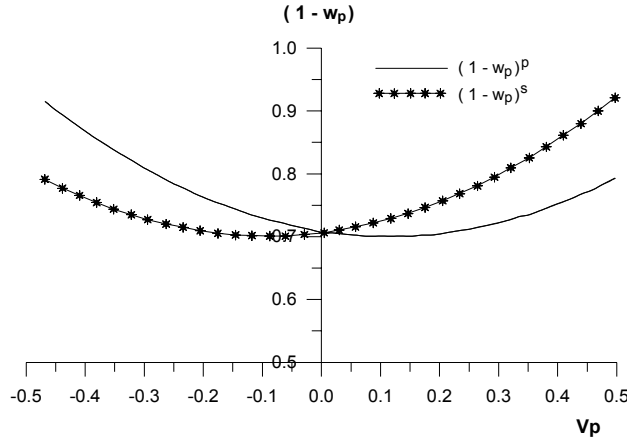


Fig. 2 $(1 - w_p)$ for port and starboard propeller

식(10)에서의 Fourier 계수 $A(k)$, $B(k)$ 는 프로펠러 단독시험에 의해서 구하거나 van Lammeren의 실험 자료[10]를 이용할 수 있다. θ 는 유체동역학적 피치각 (hydrodynamic pitch angle)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \tan^{-1}(u_p / 0.7\pi nD) \quad (14)$$

θ 는 0° 에서 360° 까지 변화하며, 제 1상한($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)에서는 $u \geq 0$, $n \geq 0$, 제 2상한($90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)에서는 $u \geq 0$, $n \leq 0$, 제 3상한($180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$)에서는 $u \leq 0$, $n \leq 0$, 제 4상한($270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)에서는 $u \leq 0$, $n \geq 0$ 의 영역에 해당된다. 그러나 이러한 방법은 광범위한 프로펠러 하중도를 다루게 되므로, 특히 제 1상한 영역에서는 정확도가 떨어지는 경향이 있다. 따라서 가장 중요하며 높은 정도(精度)가 요구되는 제 1상한에서의 추력 계산은 다음 식을 이용한다.

$$\begin{aligned} T &= K_T \rho n^2 D^4 \\ K_T &= a_1 + a_2 J + a_3 J^2 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 K_T 는 추력계수로서 전진계수 J ($J = u_p / nD$)의 2차식으로 근사 표시한다

(a_1, a_2, a_3 는 상수). K_T 는 프로펠러 단독시험에 의해서 구하거나 van Lammeren B-Screw series 프로펠러 특성[10]으로부터 구할 수 있다. van Lammeren 방법에 의한 C_T^* , K_T 의 추정예를 Figs. 3, 4에 나타낸다.

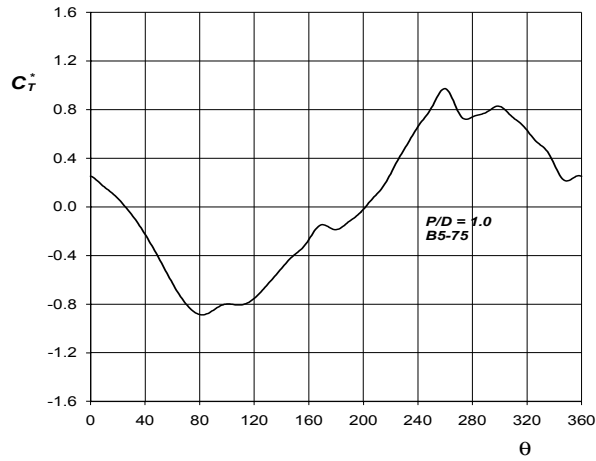


Fig. 3 Thrust coefficient C_T^* for B5-75 screw with $P/D = 1.0$ by for-quadrant measurement in open water

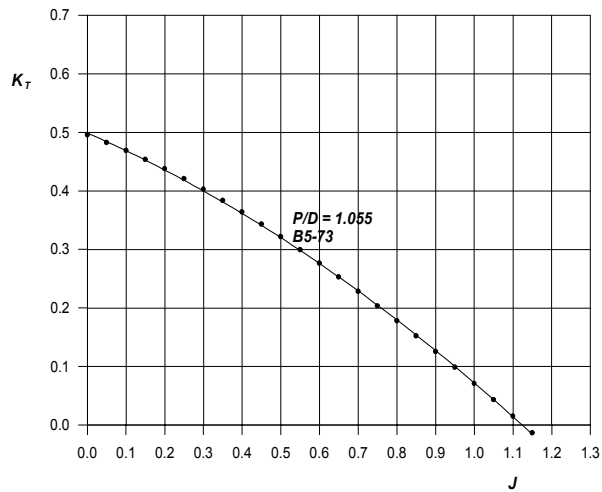


Fig. 4 Thrust coefficient K_T for B5-73 screw with $P/D = 1.055$

2.4 조타에 기인하는 유체력

2축2타선박의 조타에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1 - t_R)(F_N^{(p)} + F_N^{(s)}) \sin \delta \\
 Y_R &= -(1 + a_H)(F_N^{(p)} + F_N^{(s)}) \cos \delta \\
 N_R &= -(x_R + a_H x_H)(F_N^{(p)} + F_N^{(s)}) \cos \delta \\
 &\quad - (1 - t_R) \frac{b_R}{2} (F_N^{(p)} - F_N^{(s)}) \sin \delta
 \end{aligned} \tag{16}$$

여기서 F_N 은 타수직력, x_R 은 타수직력의 착력점의 x 좌표, t_R , a_H 는 선체에 작용하는 타의 간섭력을 나타내는 계수, x_H 는 선체에 작용하는 타의 간섭력의 작용 위치의 x 좌표를 나타낸다. 그리고 F_N 은 다음과 같이 표시된다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 f_a \sin \alpha_R \tag{17}$$

여기서 A_R 은 타의 면적, V_R 은 타에 유입하는 흐름의 유효유입속도, α_R 은 타에 유입하는 흐름의 유효양각, f_a 는 타수직력계수의 경사이다. f_a 에 관해서는 Fujii식 [12]을 이용한다.

따라서 2축2타선박의 조타에 기인하는 유체력은 식(16), (17)을 이용하여 좌현측과 우현측의 타수직력을 각각 계산하여 구하면 된다. 식(17)에서 타에 유입하는 흐름의 유효양각 α_R 과 유효유입속도 V_R 등은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 각각 다음과 같이 표시된다[13].

i) $u \geq 0$, $n > 0$ 및 $s \geq 0$ 인 경우

$$\begin{aligned}
 \alpha_R &= \delta - \delta_R && (\text{단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ) \\
 V_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \\
 u_R &= \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta \chi)s + \{1 - \eta \chi(2 - \chi)\}s^2} \\
 v_R &= u_R \tan \delta_R
 \end{aligned}$$

$$\varepsilon = (1 - w_R) / (1 - w_P) \quad , \quad \kappa = 0.6 / \varepsilon \quad (18)$$

$$w_R = w_{R0} \cdot w_P / w_{P0}$$

$$\eta = D / H_R$$

$$s = 1 - u_P / (nP)$$

ii) $u \geq 0$, $n \geq 0$ 및 $s < 0$ 인 경우 u_R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$u_R = u(1 - w_R) \quad (19)$$

iii) $u \geq 0$ 및 $n < 0$ 인 경우

$$V_R \approx 0 \quad (20)$$

iv) $u < 0$ 및 $n > 0$ 인 경우 u_R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$u_R = u + 0.6 \sqrt{\eta} nP \quad (\text{ 단, } u_R \geq 0) \quad (21)$$

v) $u < 0$ 및 $n \leq 0$ 인 경우

$$V_R = \sqrt{u^2 + (v + l_R r)^2}$$

$$\alpha_R = -\delta + \tan^{-1} \left(\frac{v + l_R r}{|u|} \right) \quad (\text{ 단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ) \quad (22)$$

여기서 w_R 은 타 위치에서의 유효반류계수, w_{R0} 는 정상 직진시의 w_R 값이다. s 는 프로펠러 슬립비, H_R 은 타의 높이, P 는 프로펠러 핏치를 나타낸다.

식(18)에서 δ_R 은 조종운동중 타수직력이 영(zero)이 되는 타각으로서, Lee는 CMT 실험결과를 토대로 2축2타선박에 대해 다음과 같은 추정모델을 제안하였다[11].

i) $\beta_R \geq 0$ 인 경우

$$\begin{cases} \delta_R^{(p)} = 0.4 \beta_R + \tan^{-1} \left| \frac{y_R}{x_R} \right| \\ \delta_R^{(s)} = 0.6 \beta_R - \tan^{-1} \left| \frac{y_R}{x_R} \right| \end{cases} \quad (23)$$

ii) $\beta_R < 0$ 인 경우

$$\begin{cases} \delta_R^{(p)} = 0.6 \beta_R + \tan^{-1} \left| \frac{y_R}{x_R} \right| \\ \delta_R^{(s)} = 0.4 \beta_R - \tan^{-1} \left| \frac{y_R}{x_R} \right| \end{cases} \quad (24)$$

$$\beta_R = \beta - l'_R \gamma'$$

여기서 β_R 은 타 위치에서의 기하학적 횡류각, l'_R 는 선체의 무게중심으로부터 타 중심까지의 무차원화된 수평거리를 나타낸다. 그리고 식(23), (24)를 Fig. 5에 나타낸다.

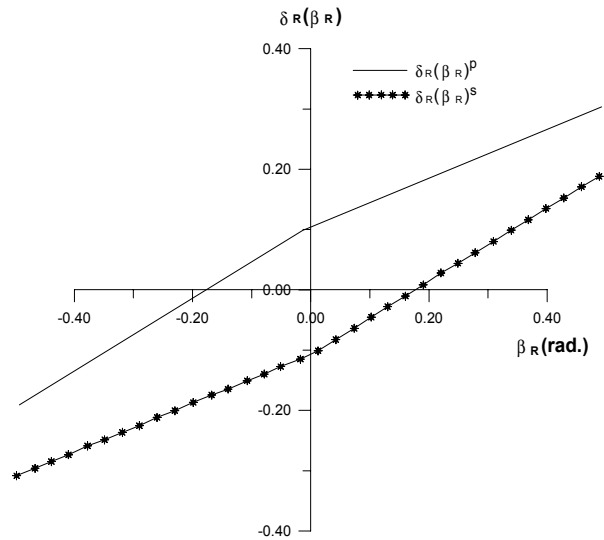


Fig. 5 δ_R for port and starboard rudder

2.5 풍압력과 예향력

바람에 의한 힘과 모멘트는 Isherwood의 회귀분석에 의한 추정식[14]을 이용하여 구한다. Isherwood 추정식에서 얻어지는 계수를 C_X , C_Y , C_N 이라 하면 바람에 의한 힘과 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_W &= C_X(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_T \\ Y_W &= C_Y(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L \\ N_W &= C_N(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L L_{OA} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} C_X \\ C_Y \\ C_N \end{pmatrix} = \sum_{j=0}^5 \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \\ C_j \end{pmatrix} \cdot I_j + \begin{pmatrix} A_6 \cdot M \\ B_6 \cdot A_{SS} / A_L \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

단, $I_0 = 1.0$, $I_1 = 2A_L / L_{OA}^2$, $I_2 = 2A_T / B^2$

$I_3 = L_{OA} / B$, $I_4 = S / L_{OA}$, $I_5 = C / L_{OA}$

L_{OA} : Length overall

A_L : Lateral projected area

A_T : Transverse projected area

A_{SS} : Lateral projected area of superstructure

S : Length of perimeter of lateral projection of vessel
excluding waterline and slender bodies such as masts and ventilaters

C : Distance from bow of centroid of lateral projected area

M : Number of distinct groups of masts or kingposts seen in lateral
projection

여기서 A_j , B_j , C_j 는 Isherwood에 의해서 주어지는 계수이다.

상대풍속 V_A 와 상대풍향각 ϕ_A 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 V_A^2 &= \sqrt{u_A^2 + v_A^2} \quad , \quad \phi_A = \tan^{-1}(v_A / u_A) \\
 u_A &= V_A \cos \phi_A = u^* + V_W \cos(\phi_W - \phi) \\
 v_A &= V_A \sin \phi_A = v^* + V_W \sin(\phi_W - \phi)
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

여기서 V_W , ϕ_W 는 절대풍속과 절대풍향각을 나타낸다.

다음으로 예선에 의한 예항력과 모멘트는 다음과 같이 계산된다. 예선의 배치를 Fig. 6과 같이 상정하고 고정점에서 예항력이 일정한 방향으로만 작용하는 것으로 가정할 때, X_T , Y_T , N_T 는 다음과 같다.

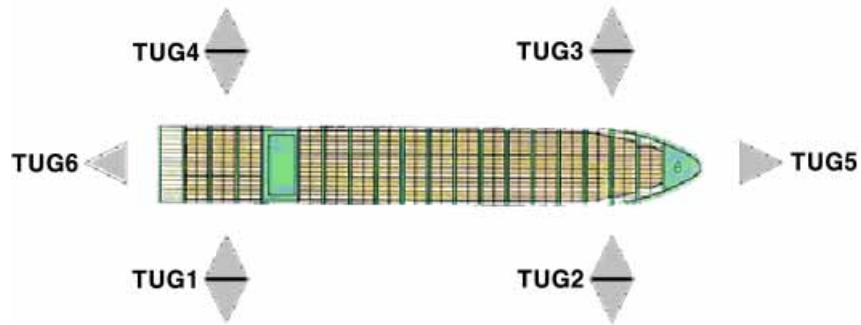


Fig. 6 Towing arrangements

$$\begin{aligned}
 X_T &= F_{t5} - F_{t6} \\
 Y_T &= -F_{t1} - F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} \\
 N_T &= (F_{t1} - F_{t4}) l_a + (F_{t3} - F_{t2}) l_f
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

여기서 F_{t1} , F_{t2} , ...는 예선의 추력을 나타내고, l_a 와 l_f 는 선수와 선미에 위치한 예선의 선체중앙으로부터의 거리를 나타내며 각각 $0.4L$ 로 취한다.

2.6 주기관 회전수 및 조타기의 응답 모델

엔진 텔레그래프의 명령 회전수에 대해 주기관 회전수는 다음과 같이 응답하는 것으로 가정한다. 즉, 기본적으로는 1차 지연 요소의 전달 특성을 상정하고, 만약 명령 회전수가 그 당시 선속에 상응하는 유전(idling) 회전수보다 낮은 경우에는 유전하는 것으로 생각한다[13]. 따라서 수학모델은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_M \dot{n} + n = \begin{cases} n^* & : (n^* < 0 \text{ or } n_i < n^*) \\ n_i & : (0 \leq n^* \leq n_i) \end{cases} \quad (29)$$

여기서 T_M 은 시정수, n^* 는 명령 회전수, n_i 는 유전 회전수를 나타낸다. 그리고 유전 회전수는 슬립비 0일 때의 프로펠러 회전수에 주기관 및 축계 등의 마찰 토크를 고려하여 다음 식으로 근사 표시된다[13].

$$n_i \approx \frac{0.7 u (1 - w_p)}{P} \quad (30)$$

조타기의 응답 모델은 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} T_E \dot{\delta} + \delta &= \delta^* \\ &: (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \\ \dot{\delta} &= \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \\ &: (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \end{aligned} \quad (31)$$

3. 조종성능의 확인

본 논문에서 제안한 수확모델을 선박조종시뮬레이터에 적용하기에 앞서 조종운동 수치시뮬레이션을 수행하여 2축2타선박의 기본적인 조종성능을 확인하고자 한다. 대상 선형은 기존의 SR-108 컨테이너운반선을 2축2타선박으로 가정한 선박으로서, 기본 제원은 Table. 1과 같다. 수치시뮬레이션을 수행하여 얻은 2축2타선박의 조종운동 추정결과를 Figs. 7~15에 나타낸다.

Table. 1 Principal dimensions of Twin-propeller Twin-rudder ship

Hull			
Length over all	L_{OA}	(m)	188.0
Length bet. per.	L_{pp}	(m)	175.0
Breadth	B	(m)	25.4
Depth	D	(m)	15.4
Draft	d	(m)	8.5
Trim	τ	(m)	1.0
Block coef.	C_B		0.559
Prismatic coef.	C_P		0.58
Distance between 2 propellers			0.3B
Angle of bossing to horizontal		(deg)	90
Radius of gyration about z-axis			0.24
Longitudinal center of gravity from midship			-0.018
Rudder			
Area	A_R	(m ²)	13.345×2
Height	H	(m)	5.44
Aspect ratio			1.833
Area ratio	A_R/Ld		1/55.73
Propeller			
Diameter	D	(m)	4.6
Pitch Ratio	P/D		1.055
Expanded area ratio			0.73
Number of Blades			5
Turning direction (looking from stern)			outboard

Fig. 7은 일반 선회시험(conventional turning test)으로서 초기 선속 13.6 *knots* (half ahead)의 상태에서 타각 35°로 명령하였을 때 2축2타선박의 우선회운동(starboard turning motion)을 시뮬레이트한 것이다. Figs. 8, 9는 10°/10° 지그재그조종시험(zigzag maneuvering test)과 나선형조종시험(spiral maneuvering test)을 나타내고 있으며, Figs. 10, 11은 가속선회시험(accelerating turning test)과 감속선회시험(coasting turning test)을 보여주고 있다. 가속선회시험은 정지상태에 있는 선박에 13.6 *knots*의 선속에 해당하는 프로펠러 회전수와 타각 35°의 명령을 동시에 내려 수행되었으며, 감속선회시험은 13.6 *knots*의 선속으로 정상직진운동을 하고 있는 선박에 프로펠러 회전수 영(zero)과 타각 35°의 명령을 동시에 내려 수행되었다. Figs. 12, 13은 2축2타선박의 정지운동(stopping motion)을 시뮬레이트한 것으로 각각 정지거리(stopping distance)와 정지시간(stopping time)을 나타내고 있다. 정지운동은 “half ahead”의 상태로 정상직진운동을 하고 있는 선박에 “half astern”에 해당하는 프로펠러 회전수를 명령하여 수행되었다. Figs. 14, 15는 예선에 의한 선박의 운동을 시뮬레이트 한 것으로서 초기 선속 1.0 *knots*의 상태에서 선수와 선미에 위치하고 있는 예선들에 의한 횡이동운동과 선체중양을 중심으로 한 회두운동을 각각 나타내고 있다.

수행된 계산결과는 선박조종시뮬레이터의 활용 시 변침, 피항, 접·이안하기 위한 참고자료가 될 것이다.

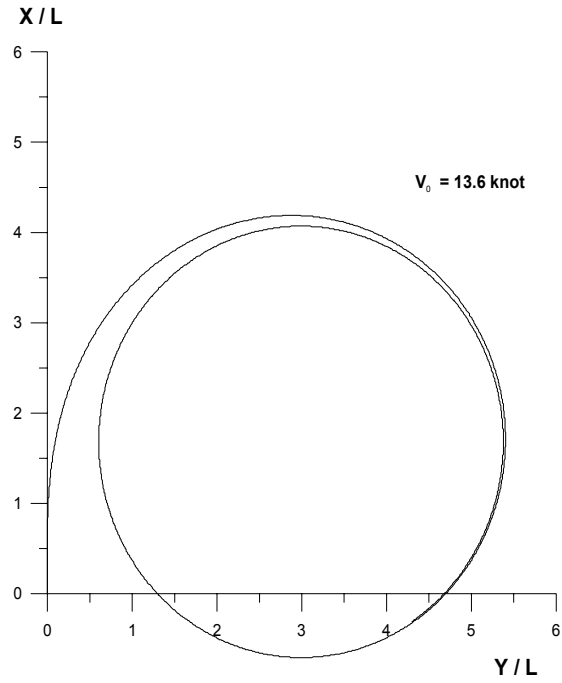


Fig. 7 Conventional turn

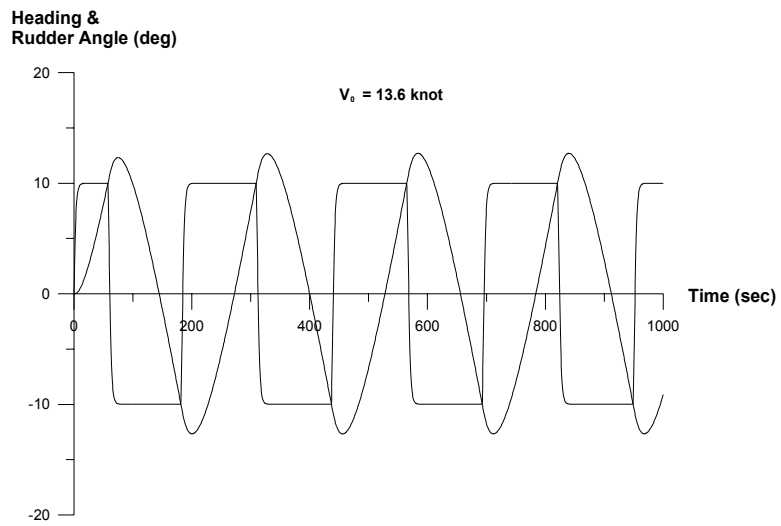


Fig. 8 $10^\circ/10^\circ$ Zigzag maneuver

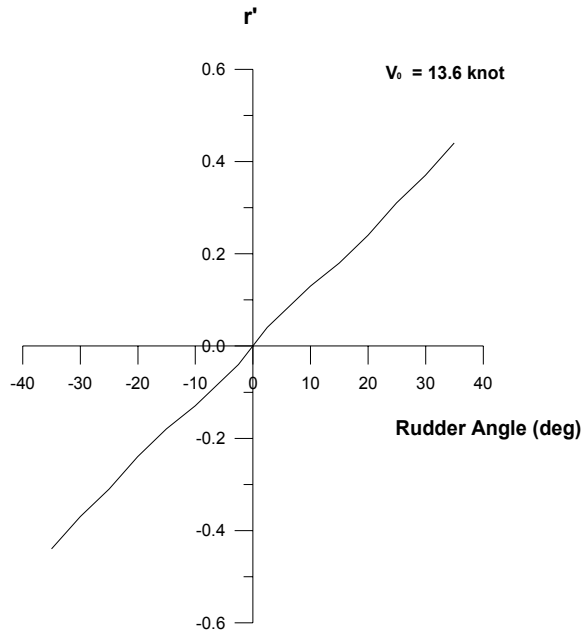


Fig. 9 Turning characteristics

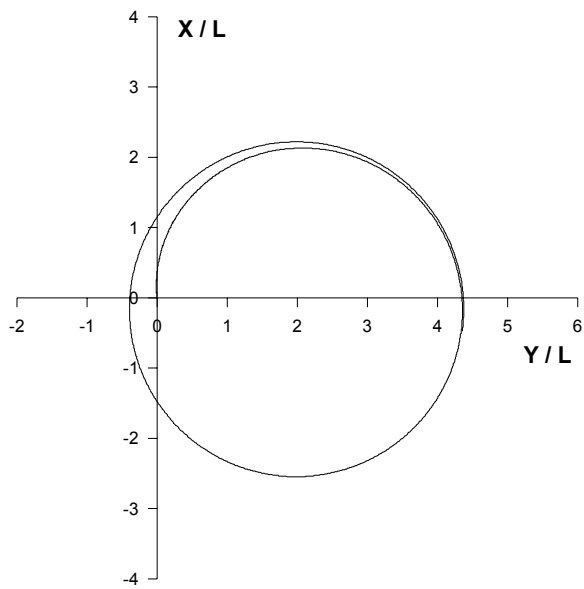


Fig. 10 Accelerating turn

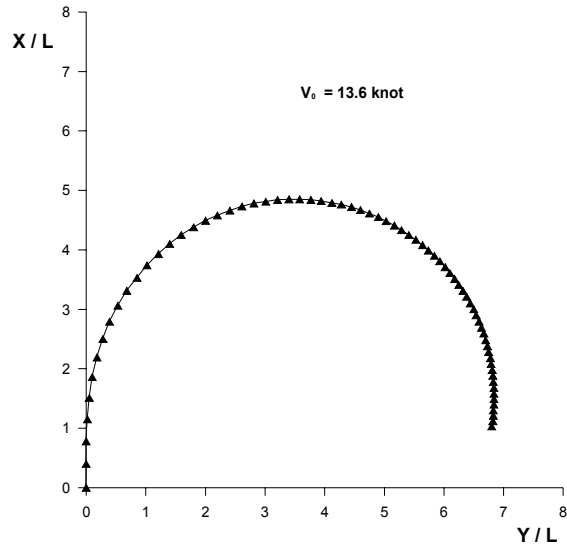


Fig. 11 Coasting turn

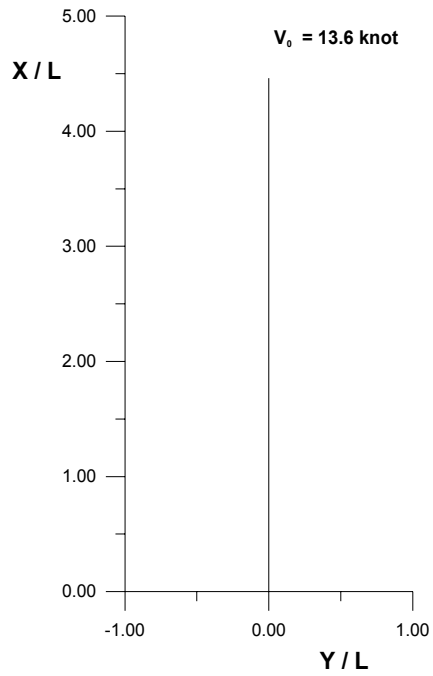


Fig. 12 Stopping distance

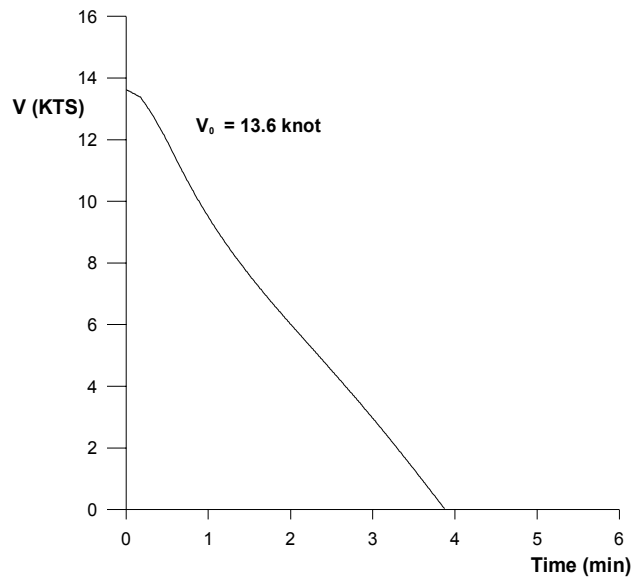


Fig. 13 Stopping time

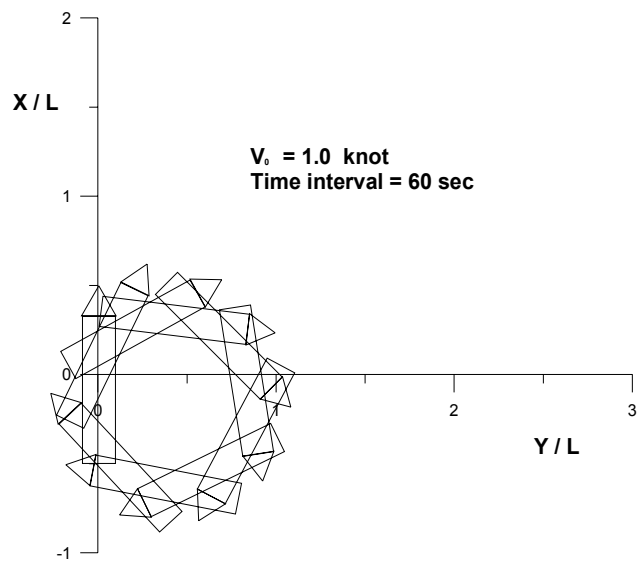


Fig. 14 Simulation on turning operation by both bow and stern tugs

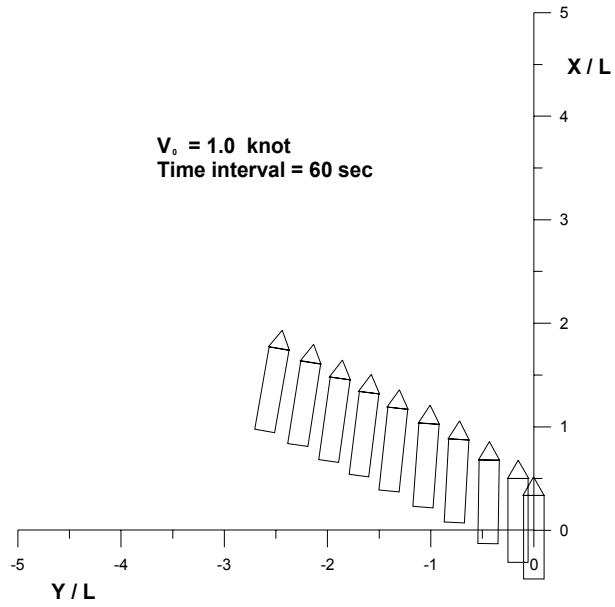


Fig. 15 Simulation on lateral shifting operation by both bow and stern tugs

4. 시스템 구성과 역할

2축2타선박의 조종운동 수학적모델을 적용하여 선박조종시뮬레이터의 시스템을 개
선·구축하였다. 본 선박조종시뮬레이터의 시스템 구성과 구성요소들의 기능·역할은
다음과 같다.

4.1 시스템 구성

Fig. 16은 본 선박조종시뮬레이터가 재현되는 과정을 블록다이어그램으로 보여주고
있다. 선장의 명령에 의해 조타륜(steering wheel), 엔진텔레그래프(engine telegraph),
예선(tug)이 제어되며 입력된 각각의 명령 데이터를 이용하여 선박의 조종운동을 계
산하게 된다. 계산 결과는 2차원, 3차원 영상을 통하여 선박의 거동을 실시간으로, 그
리고 실감있게 보여주며 각종 항해정보들이 게이지(gage)에 표시된다. 선장은 이러한
정보들을 이용하여 항만 내에서 선박을 조종하게 된다. 물론, 바람과 조류의 영향이
고려되며 접·이안 시에는 예선을 사용할 수도 있다.

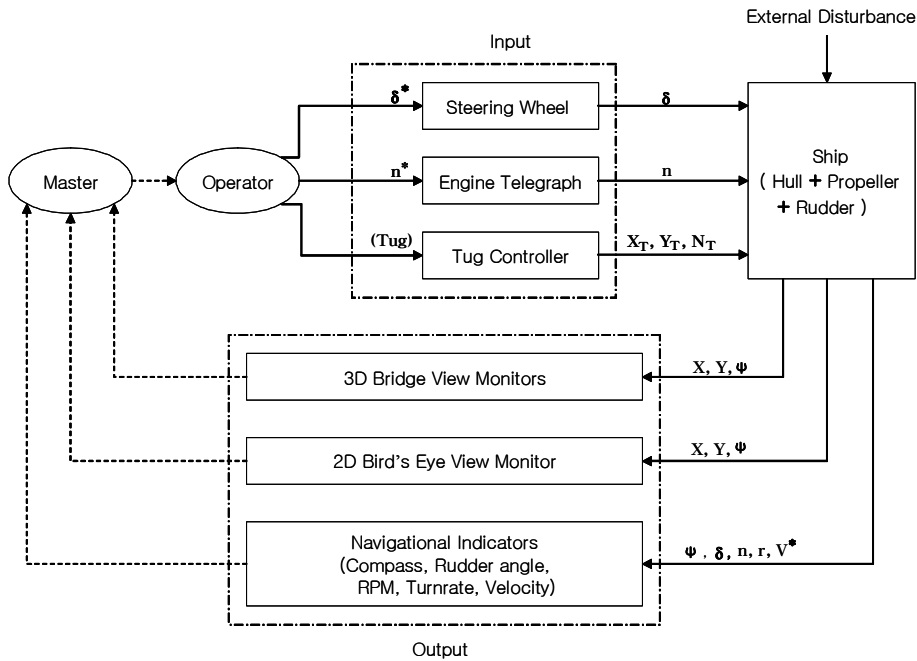


Fig. 16 Schematic diagram for realization of ship-handling simulator

본 선박조종시물레이터는 Fig. 17과 같이 운동계산부(Ship Dynamics Calculation), 제어입력부(Operation Panels), 항해정보출력부(Navigational Indicators), 3차원시계재현부(3D Bridge View), 2차원조감도(2D Bird's Eye View), Instructor's Console의 6 구성요소로 되어 있다. 3차원시계재현부에는 3대의 PC(Personal Computer)와 프로젝터(projector)가 배치되어 있으며 나머지 요소에는 각각 PC가 한 대씩 배치되어 총 8 대의 PC로 시물레이터가 구성되어 있다.

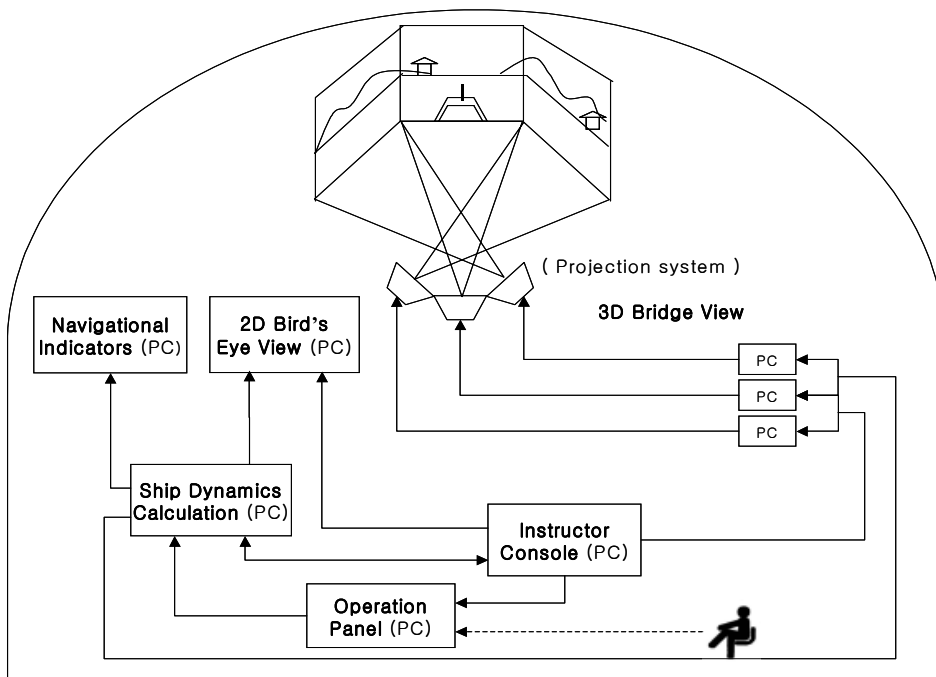


Fig. 17 System composition of present ship-handling simulator

Fig. 17에 나타낸 것과 같이 본 선박조종시물레이터에서는 각 구성요소들간의 데이터 전송을 위하여 분산처리 네트워크 방식(distributed data processing network technique)을 채택하였다[15]. 효율적인 데이터 전송을 위해 각 구성요소들의 기능과 역할 그리고 상호관계를 고려하여 TCP(Transmission Control Protocol) 방식과 UDP(User Datagram Protocol) 방식 중 어느 하나를 이용한다. TCP 방식과 UDP 방식은 IP(Internet Protocol)를 기반으로 해서 패킷(Packet) 형식으로 데이터를 전송하게 되는데, TCP 방식은 신뢰성이 보장되는 양방향 데이터 전송 서비스를 하며 이를

실현하기 위해 데이터의 송수신 확인 절차를 거친다[16]. UDP 방식은 신뢰성이 보장되지 않고 비연결적인 데이터그램(Datagram) 전송 구조를 가지고 있으므로 TCP 방식보다는 데이터 전송이 빠르다고 할 수 있다[16]. 따라서 고신뢰성의 TCP 방식과 빠른 데이터 전송의 UDP 방식을 어떤 구성요소 사이에 적용시키느냐는 것이 시뮬레이터의 구성에 있어서 중요하다. 본 선박조종시뮬레이터에서는 2차원조감도와 3차원시계재현부는 정확한 데이터 전송도 중요하지만 그보다 실시간으로 영상을 재현해야 하기 때문에 빠른 데이터 전송을 지원하는 UDP 방식을 채택하여 각각 운동계산부와 연결하였다. 그리고 나머지 구성요소들간의 연결은 빠른 데이터 전송보다는 데이터의 신뢰성이 더욱 요구되기 때문에 TCP 방식을 채택하였다.

4.2 구성요소들의 기능과 역할

각 구성요소들은 객체지향 프로그래밍언어(Object oriented programming language)인 Visual C++을 기반으로 프로그래밍 되었다[17][18].

4.2.1 운동계산부

운동계산부에서는 Instructor's Console로부터 얻어진 자선(own-ship)과 환경조건에 대한 데이터를 기반으로 하여 제어입력부로부터 RPM, 타각(Rudder Angle) 등의 데이터를 전송 받아 자선의 조종운동 수학모델을 일정 시간간격으로 계산한다. 그리고 계산 결과는 3차원시계재현부, 2차원조감도 및 항해정보출력부로 보내어진다. 본 시뮬레이터에서는 0.1초 간격으로 계산되어지며 또한 0.1초 간격으로 데이터를 전송한다.

2축2타선박의 조종운동 수학모델은 이 운동계산부에 주로 적용된다. 2개의 프로펠러(Twin Propeller)와 2개의 타(Twin Rudder)를 각각 하나의 객체(Object)로 생각하고 그에 해당하는 객체들을 생성하였다. 생성된 객체들을 기존의 프로그램 라이브러리(*.lib)에 추가하여 운동계산부를 구성하였다. Fig. 18은 운동계산부의 클래스(class) 구성을 나타내고 있다.

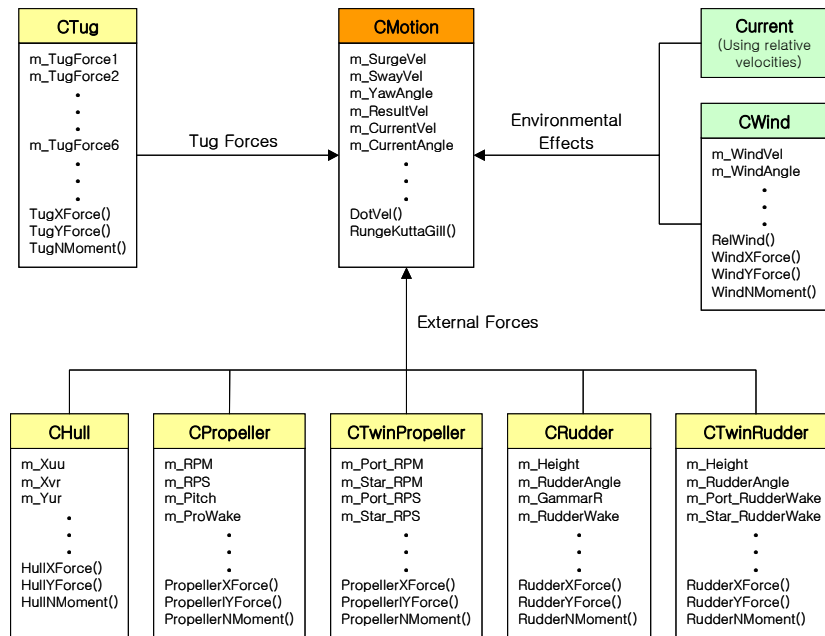


Fig. 18 Class composition of Ship Dynamics Calculation

4.2.2 제어입력부

제어입력부는 타, 주기관, 예선의 작동을 담당한다. 선장의 명령에 따라 모니터 스크린 위의 조타륜(steering wheel), 엔진텔레그래프(engine telegraph), 예선 컨트롤러(tug controller)를 마우스로 조작하게 된다. 명령된 타각, 프로펠러 회전수, 예선의 위치와 힘에 대한 정보들이 운동계산부로 전송된다. Fig. 19는 2축2타선박의 제어입력부를 나타내고 있다.

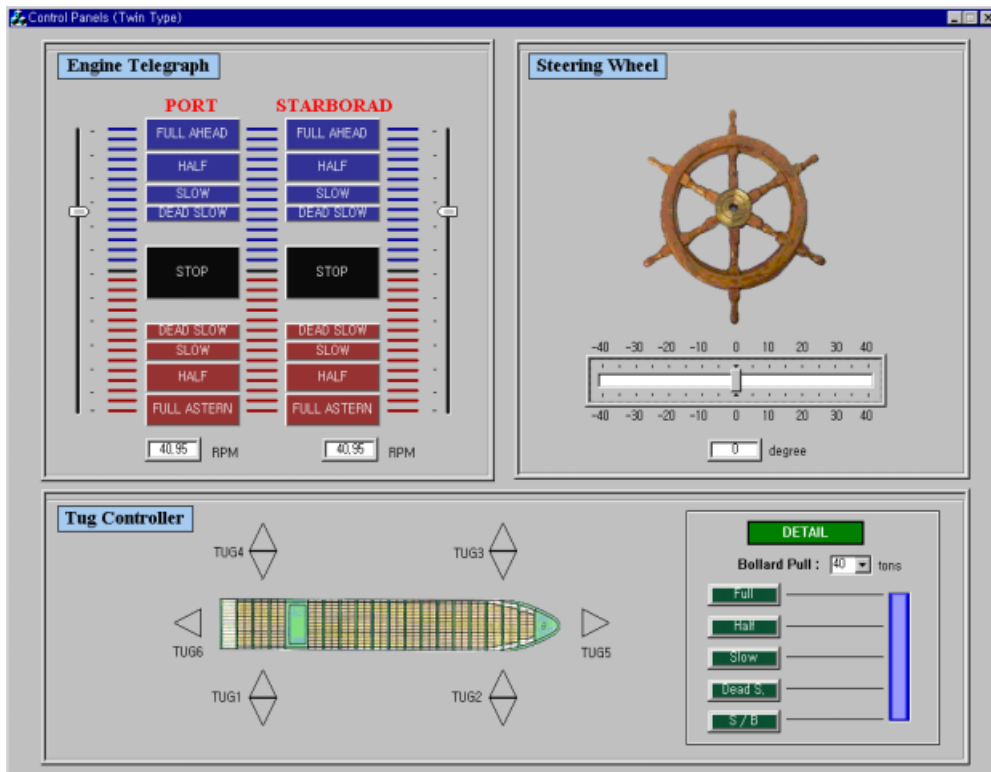


Fig. 19 Screen of Operation Panels for twin-screw and twin-rudder ship

4.2.3 항해정보출력부

항해정보출력부는 자선에 대한 항해정보를 아날로그 게이지(analogue gage)들을 이용해 보여주는 역할을 한다. 각 게이지들은 자선의 침로각(heading angle), 프로펠러 회전수, 타각, 회두각속도(turn rate) 그리고 선속을 나타낸다. 아날로그 게이지 외에도 모든 정보들은 디지털로 표시되며 바람과 조류의 속도에 대한 정보들도 표시된다. Fig. 20은 2축2타선박의 항해정보출력부를 나타내고 있다.

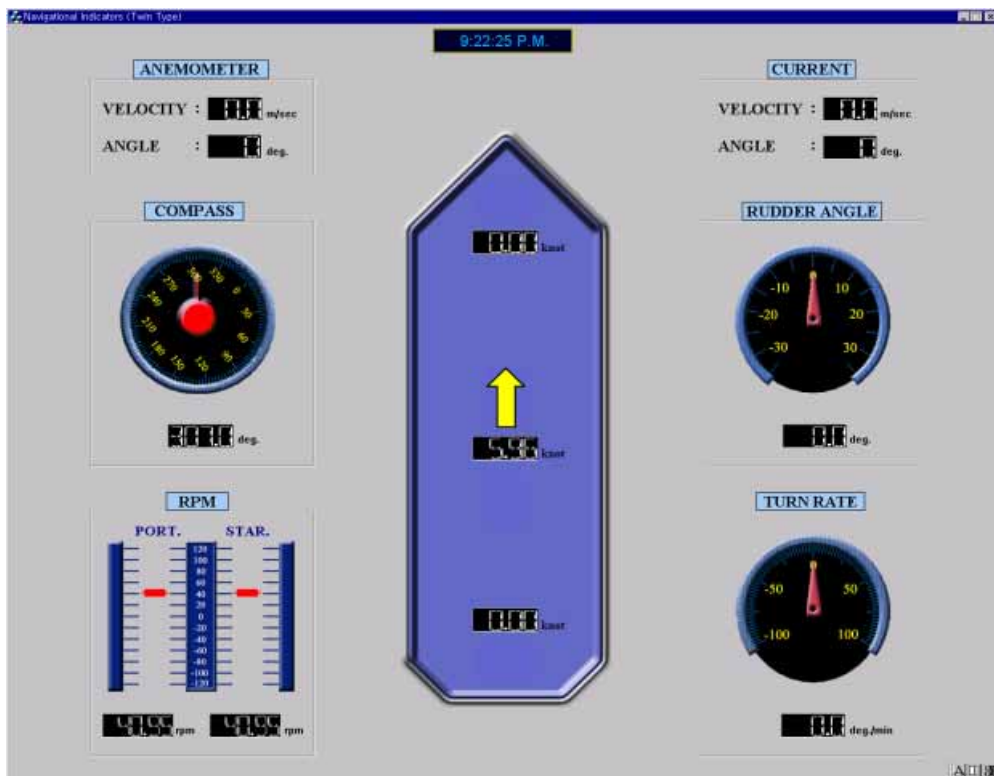


Fig. 20 Screen of Navigational Indicators

4.2.4 3차원시계재현부

3차원시계재현부는 선박조종과 관련된 시계정보를 3차원 영상을 통하여 선장에게 보여주는 역할을 하는 가장 중요한 구성요소로서 3대의 PC와 프로젝터로 구성되어 있다. 3차원 영상 시스템은 각종 지형정보와 수평면상에서의 선박조종운동을 실시간으로 재현한다. 또한 시각적 현실감을 위해 선수의 상하운동도 3차원 영상에 의해 재현된다. 각각의 프로젝터 스크린은 좌우 45°, 상하 30°의 시야범위를 가지며, 총 좌우 135°, 상하 30°(위로 10°, 아래로 20°)의 시야범위를 이루고 있다. 관찰자(observer)의 위치는 조타실(wheel house)의 세로중심선상에 놓여 있는 자이로 컴퍼스 리피터(gyro-compass repeater)를 기준으로 하여 설정하였다. Fig. 21은 3차원시계재현부의 스크린 시야범위를 나타내고 있다.

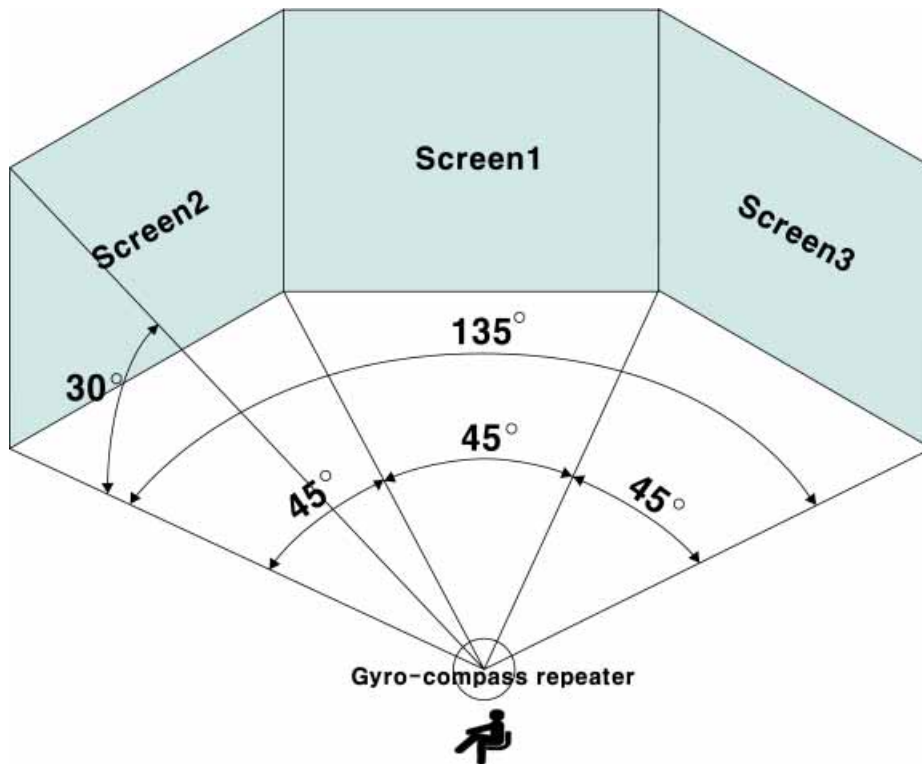


Fig. 21 Visual field of 3D Bridge View

4.2.5 2차원조감도

Fig. 22에 나타낸 것과 같이, 2차원조감도는 2차원 지형, 자선과 타선의 위치에 대한 정보를 보여주는 기능을 한다. 2차원조감도는 레이다(radar)의 기능을 행하는 것으로 생각할 수 있다.

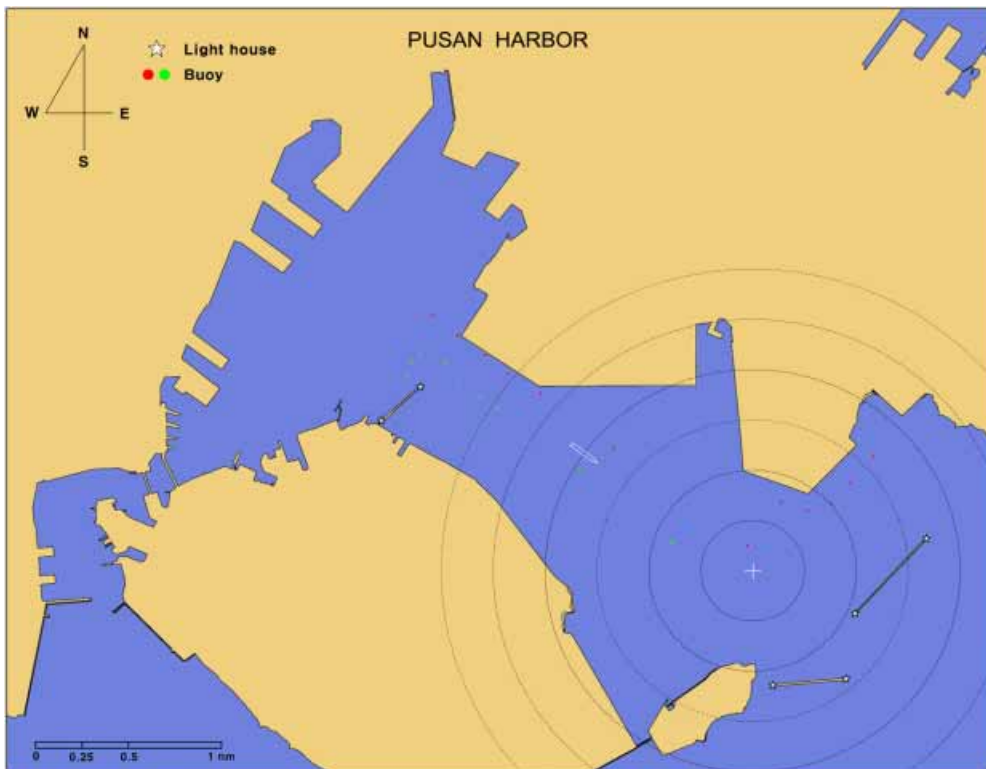


Fig. 22 Screen of 2D Bird's Eye View

4.2.6 Instructor's Console

Instructor's Console은 4가지의 기능을 수행한다. 첫째, 선박과 항만에 대한 데이터베이스를 관리하며, 둘째로 바람, 조류, 주야, 날씨 등과 같은 환경에 대한 세팅기능을 수행한다. 셋째, 앞서 언급한 어플리케이션(application)들을 제어하며 시뮬레이터의 전체적인 구동을 담당한다. 마지막으로, 타선의 선종, 위치, 선속 그리고 항로 등을 설정하고 타선의 운동을 계산하는 역할을 담당하고 있다. Fig. 23은 Instructor's Console을 이용한 데이터베이스 관리의 실례(實例)를 보여주고 있다.

The screenshot displays the Instructor's Console interface, which is divided into several sections for configuring ship and environment parameters.

SHIP

- Ship Name:
- Ship Type:
- OwnShip or TargetShip:
- OwnShip:
- TargetShip:

INITIAL CONDITION

- Ship Speed [knot]:
- Heading Angle [deg]:
- RPM:
- Order RPM:
- Order Rudder Angle [deg]:
- Pitch Amplitude [m]:
- Pitch Period [sec]:
- X-Position of Ship [m]:
- Y-Position of Ship [m]:

ENVIRONMENTAL CONDITION

- Wind:
 - Velocity [m/sec]:
 - Angle [deg]:
- Time of Day:
 - Day Night
- Weather:
 - Clear Cloudy
 - Rain Snow
- Current:
 - Velocity [knot]:
 - Angle [deg]:

Principal Particulars

- Length Between Perpendiculars [LBP] : 175.0
- Length Over All [LOA] : 188.0
- Breadth of Ship [B] : 25.4
- Mean Draft of Ship [d] : 0.5
- Block Coefficient [Cb] : 0.559
- Prismatic Coefficient [Cp] : 0.58
- Waterplane Coefficient [Cw] : 0.68
- Mass of Ship [m] : 0.16227
- Added Mass in the x direction [mx] : 0.004858
- Added Mass in the y direction [my] : 0.176588
- Moment of inertia [Ixx] : 0.005347
- Added Moment of inertia [Ixxr] : 0.009582
- x Position of the centre of buoyancy [Alpha] : 0.0
- x Position of the centre of gravity [KG] : -0.018

Hydrodynamic Derivatives

- Xuu : -0.007264
- Xvr : -0.100644
- Xv : -0.287056
- Yur : 0.003477
- Yvv : -0.078286
- Yvr : -0.170407
- Yur : -0.060831
- Nv : 0.0
- Nur : -0.000686
- Nr : -0.044539
- Nvvr : -0.264242
- Nuvr : 0.019058
- Nr : -0.045523

OwnShip / TargetShip

- OwnShip:
- TargetShip:

Connection with Dynamics Calculation for Ownship
 Connection with Dynamics Calculation for Targetship
 Connection with Control Panels
 Connection with Navigational Indicators
 Connection with 2D Bird's Eye View
 Connection with 3D Bridge View

Fig. 23 Database format on Instructor's Console

5. 3차원 모델링과 실시간 VR(Virtual Reality) 시뮬레이션

VR 시뮬레이션에 있어서 여러 지형지물과 선박 등을 실시간으로 재현하기 위해서는 3차원 모델을 기하학적이고 계층적으로 묘사하는 과정이 필요하다. 이와 같은 모델을 생성할 수 있는 3차원 모델 제작도구로서 MultiGen(MultiGen-Paradigm Inc.)을 이용하여 모델을 생성하였다. MultiGen은 실시간 시뮬레이션이 요구하는 모델링 시스템인 OpenFlight 데이터 포맷을 사용하며 3차원 표면 모델링 및 특수효과 모델링을 처리하는데 있어서 매우 탁월하다[19]. Fig. 24는 항만과 선박의 3차원 모델 생성 과정을 나타내고 있다. Figs. 25~28은 부산항과 선박의 3차원 모델과 모델계층도의 예를 보여주고 있다. 크레인, 등대, 부표 등과 같은 다른 객체들도 이와 같은 방법으로 3차원 모델을 생성하였다.

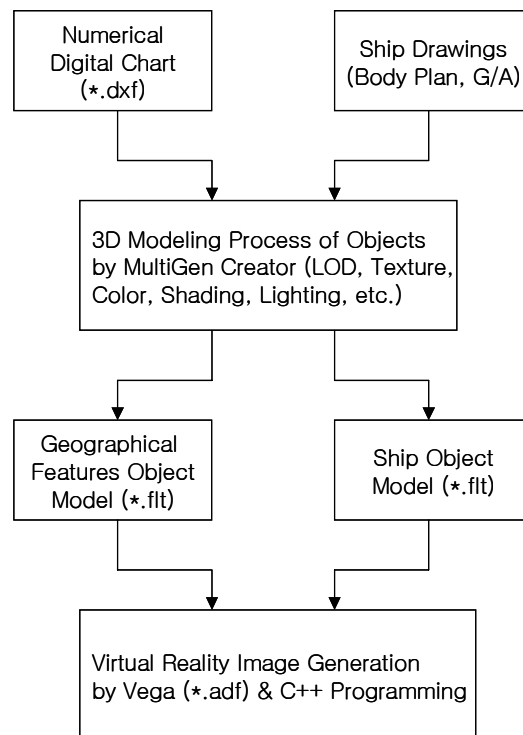


Fig. 24 Image generation procedure for geographical features and ship

다음으로 실시간 애니메이션을 위한 3차원 렌더링 기법이 필요하다. 시뮬레이션 대상 물체의 운동상태를 실시간으로 정확히 표현해야 하며 움직이고 있는 물체에 대해 부드럽고 연속적인 영상이 요구된다. 이를 위해 3차원 그래픽 렌더링 툴로서 SGI (Silicon Graphics Inc.)의 IRIS GL 개방형 시스템인 OpenGL을 기반으로 하는 Vega (MultiGen Paradigm Inc.)를 이용하였다[20]. Vega는 MultiGen에 의해 생성된 여러 모델들(OpenFlight files)을 기반으로 하여 ADF 파일(Application Definition File)이라는 VR 모델을 생성하며 C++ 프로그램과 연동되어 그래픽 렌더링을 한다. ADF 파일은 자선, 타선과 같은 동적 객체들(dynamic objects)과 지형 등과 같은 정적 객체들(static objects)을 포함하며 동적 객체들은 실시간으로 계산된 선박의 위치와 침로각에 대한 정보에 따라 움직이게 된다. 또한 Vega는 다양한 환경들(주야, 안개, 비 등)을 설정할 수 있으며 그 밖에도 많은 기능들을 가지고 있다.

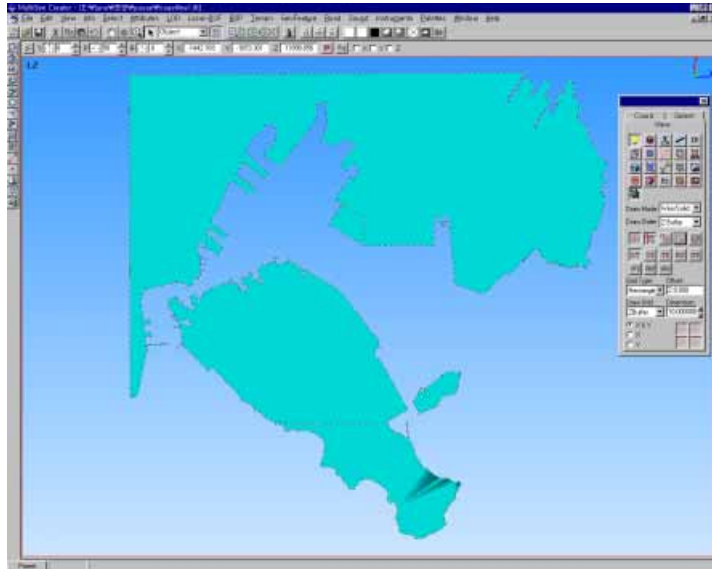


Fig. 25 Coastal Line of Pusan Harbor model

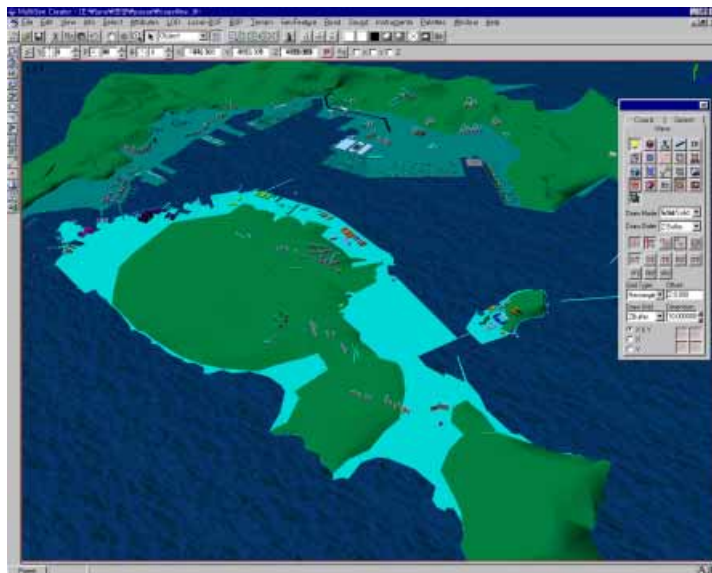


Fig. 26 3D Image of Pusan Harbor model

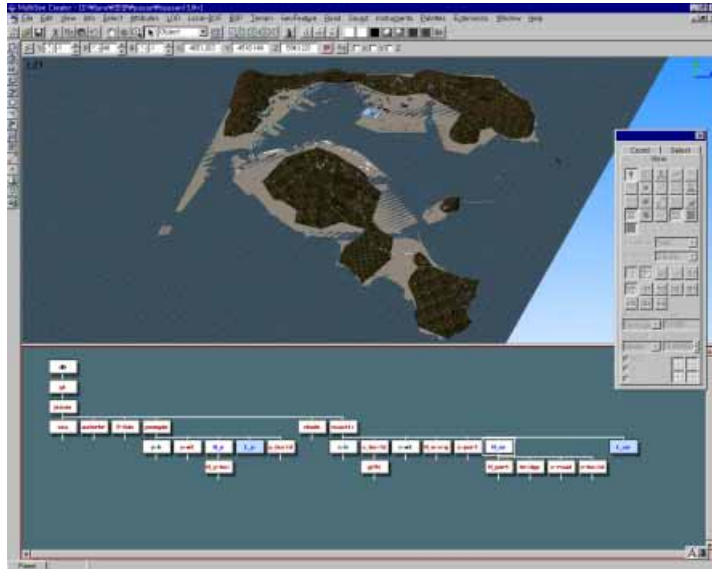


Fig. 27 Hierarchical visual database of Pusan Harbor model

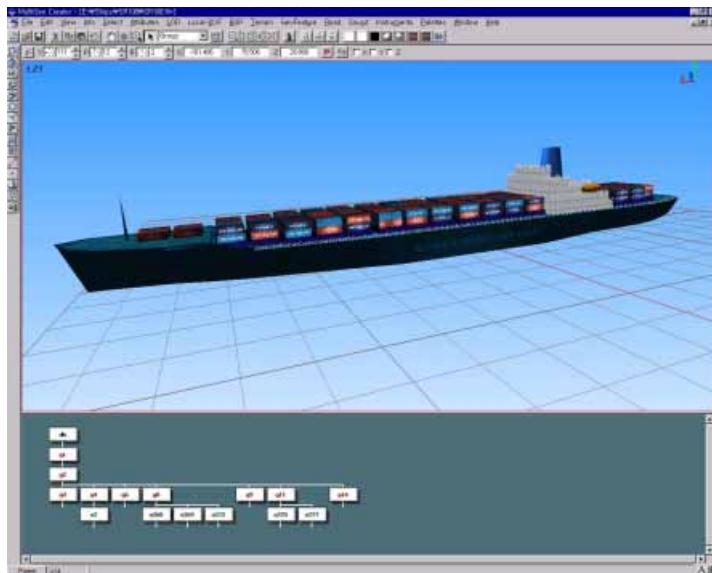


Fig. 28 3D image and hierarchical visual database of ship model

6. 실시간 시뮬레이션 예

본 선박조종시뮬레이터를 이용하여 부산항에 대한 2축2타선박의 조종 시뮬레이션을 수행하였다[21]. 시나리오는 부산 외항 방파제에서 도선사(pilot)가 승선하여 자성대부두에 접안하는 것으로 하였다. 초기 선속은 5.96 *knots* (dead slow ahead)이며 입항시 침로각은 307°로 상정하였다. 그리고 바람, 조류에 대한 외부환경조건을 설정하였으며 Table. 2에 나타내었다. Figs. 29~33은 부산항에 적용한 2축2타선박의 실시간 시뮬레이션 적용 예를 나타내고 있다.

Table. 2 External environmental condition

Condition	Contents
Time of day	Day
Wind	10 <i>m/sec</i> (V_w), 45° (ϕ_w)
Current	0.5 <i>knots</i> (V_c), 180° (ϕ_c)
Fog	Nothing

Fig. 29는 부산 외항 방파제 부근에서의 입항 초기 장면을 나타내고 있다. 도선사는 이곳에서 승선하게 되고 항로를 따라 입항하게 된다. Fig. 30은 입항하는 도중 타선과 서로 만나는 장면을 나타내고 있다. 자성대부두의 정박 위치에 다다르게 되면 2척의 예선이 선수와 선미에 각각 배치되어 사용 가능하게 된다. Fig. 31은 2축2타선박이 자성대부두에 정박된 모습을 나타내고 있다. Figs. 32, 33은 조종 시뮬레이션이 완료된 후 출력되는 결과이다. Fig. 32는 자선의 항적(航跡)을 나타내고 있으며 Fig. 33은 자선에 대한 조종운동 파라미터들의 시간경과에 따른 변화를 보여주고 있다.

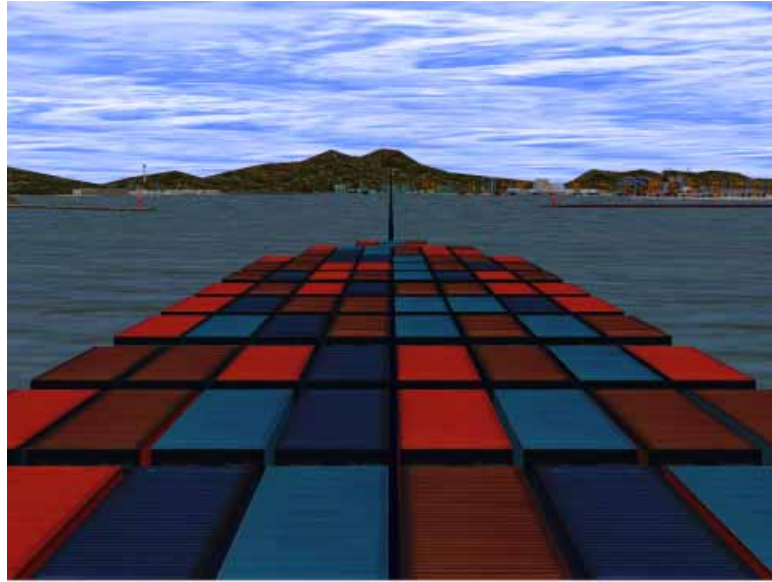


Fig. 29 Captured 3D view from bridge of the ship at the position near breakwaters of Pusan Harbour entrance, where the pilot gets on board ship



Fig. 30 Bridge view of meeting with target-ship on the passage of Pusan Harbour



Fig. 31 Bridge view of mooring at Chasongdae Container Wharf of Pusan Port

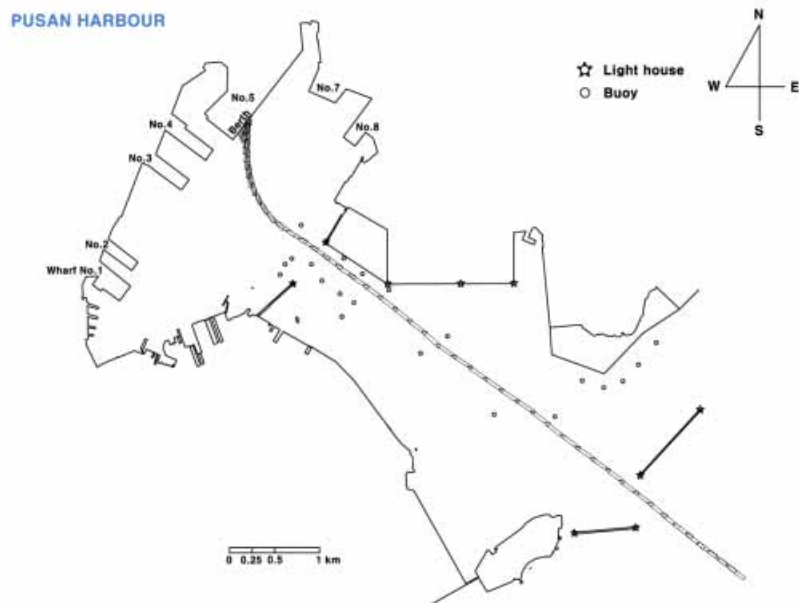


Fig. 32 2D display of tracks of ownship during berthing manoeuvre

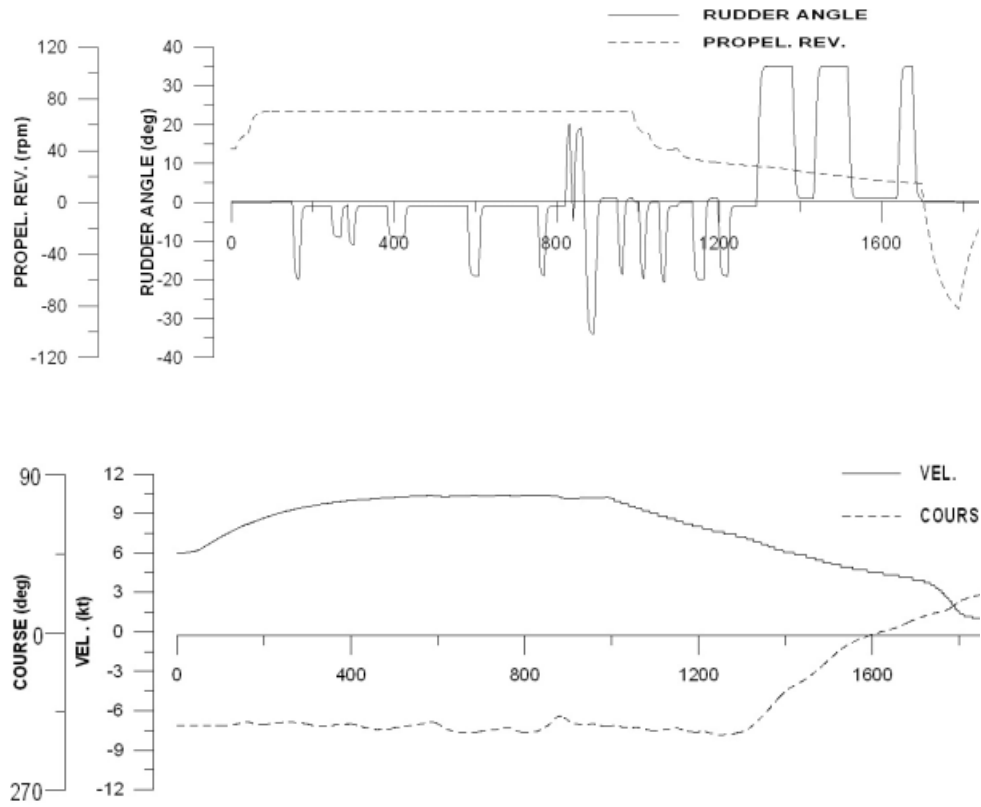


Fig. 33 Time histories of motion parameters of ownship during berthing manoeuvre

7. 결 론

본 논문에서는 2축2타선박을 고려한 선박조종시뮬레이터의 시스템 구축에 관하여 논하였다. 2축2타선박의 조종운동 수학모델에 대해서 논하였으며 기본적인 조종성능을 확인하였다. 제안한 수학모델을 선박조종시뮬레이터에 적용하였고 부산항을 대상으로 조종 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 논문에서 제안한 수학모델은 2축2타선박의 입·출항 조종운동을 추정하는데 유용할 것이며, 일반 선속영역까지의 조종운동을 포함한다.
- (2) 프로펠러에 기인하는 유체력과 타에 기인하는 유체력은 우현측과 좌현측을 각각 고려하여 표현할 수 있다.
- (3) 2축2타선박의 선체·프로펠러·타의 상호간섭은 1축1타선박과 달리 표현해야 한다.
- (4) 2축2타선박의 조종운동 수학모델에 대한 객체들을 생성하고 기존의 프로그램에 추가함으로써 2축2타선박을 선박조종시뮬레이터에 적용할 수 있었다. 또한, 2축2타선박에 대한 별도의 애플리케이션(제어입력부, 항해정보출력부)을 구성할 필요가 있었다.
- (5) 1축1타선박만으로 구성되어 있는 선박 데이터베이스에 2축2타선박을 추가함으로써 다양한 선박에 대한 조종 시뮬레이션을 가능하게 하였다.
- (6) 선박조종시뮬레이터를 이용하여 2축2타선박을 부산항에 적용해 보았으며 그 활용성을 검토하였고 2축2타선박의 조종성능을 실시간으로 3차원 영상을 통하여 직접 확인할 수 있었다.

본 선박조종시뮬레이터는 항해사의 선박 조종 훈련용과 항만 수로 설계시 안전성 평가용 그리고 그 밖의 여러 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 앞으로 다양한 가상현실 기법을 활용하여 자연스러운 실세계 영상을 만들어야 할 것이고 시뮬레이션의 중요한 요소인 수학모델에 있어서도 여러 가지 선박의 운동과 다양한 외력의 영향을 고려한 수학모델에 관하여 연구해야 할 것이다. 또한 IMSF에 제안하고 있는 Full Mission 형태로의 시뮬레이터 개발을 위해 레이더(Radar)와 전자해도(Electronic Chart Display Information System)를 이용한 더 실제에 가까운 브릿지(Bridge) 정보를 표현해야 하며, 하드웨어장비를 이용해 조종제어하고 항해정보를 나타낼 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Cross, Stephen J., et al., "Classification of Maritime Simulators, the Final Attempt Introducing DNV'S New Standard" , Proceedings of MARSIM 2000, Orlando, Florida, 2000.
- [2] Ogawa, A., et al., "MMG Report I" , Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, No. 575, 1977.
- [3] Sohn, Kyoung-Ho, "Ship Motion & Manoeuvrability" , Textbook, Division of Marine Systems Engineering of Korea Maritime University, 2000.
- [4] Newman, J.N., "Marine Hydrodynamics" , page 135~144, The MIT Press, Cambridge, 1978.
- [5] Sohn, Kyoung-Ho, "Hydrodynamic Forces and Maneuvering Characteristics of Ships at Low Speed" , Transaction of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 29, No. 3, 1992.
- [6] Inoue, S., et al., "Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring" , ISP, Vol. 28, No. 320, 1981.
- [7] Takashina, J., "Ship Manoeuvring Motion due to Tug Boats and its Mathematical Model" , Naval Architecture and Ocean Engineering, Japan, Vol. 25, 1987.
- [8] Hirano, M., "Some Notes on Prediction of Ship Manoeuvring Motion" , Workshop on Prediction of Ship Manoeuvrability held by the West-Japan Society of Naval Architects, Fukuoka, Japan, Nov. 1992.
- [9] Mikelis, Nicos E., "A Procedure for the Prediction of Ship Manoeuvring Response for Initial Design" , Proceedings of International Conference ICCAS 85 : Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design, Trieste, Sept. 1985.
- [10] Lammeren, W.P.A. et al., "The Wageningen B-Screw Series" , Transaction of SNAME, Vol. 77, 1969.

- [11] Lee, Seung-Keon, et. al., "Research on the Prediction of Maneuvering Motion for a Twin-Screw Twin_Rudder Ship" , Transaction of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 4, 1996.
- [12] Fuji, J., "Experimental Research on Rudder Performance(1st Report)" , Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 107, 1960.
- [13] Yoshimura, Y., "Mathematical Model of Manoeuvring Behaviour of Ships with a Propeller Idling, Boosting and Reversing, and its Application" , Thesis submitted for Degree of Doctor of Engineering, Osaka University, 1980.
- [14] Isherwood, R. M., "Wind Resistance of Merchant Ship" , Transaction of RINA, Vol. 114, 1972.
- [15] Hong, Ki-Young, "A Study on Construction of Real Time Ship-Handling Simulator Using the Distributed Processing Network Method" , Thesis submitted for Degree of Master of Engineering, Korea Maritime University, 2001.
- [16] Arick, Martin R., "The TCP/IP Companion : A Guide for the Common User" , QED Publishing Group, Boston, 1993.
- [17] Kim, Yong-Sung, "Visual C++ 6 Perfect Guide" , Youngjin Publishing Corp., 1999.
- [18] Lee, Sang-Youp, "Visual C++ Programming Bible Ver. 6.x" , Youngjin Publishing Corp., 2000.
- [19] "MultiGen Creator User's Guide" , MultiGen Paradigm Inc., 1997.
- [20] "Vega Programmer's Guide Version 3.5" , MultiGen Paradigm Inc., 2000.
- [21] Lee, Sung-Wook, "A Study on Real Time Simulation of Harbour Manoeuvre and Development of Desktop Type Simulator" , Thesis submitted for Degree of Master of Engineering, Korea Maritime University, 1998.