

공학석사 학위논문

# 충돌재현 시뮬레이터의 구축 및 해난사고 분석에의 적용에 관한 연구

A study on Construction of Collision Reproducing Simulator  
and Application to Analysis of Marine Casualty

지도교수 손 경 호

2004년 1월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

배 준 영

本 論文을 金鎮國의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 : 현 범 수 (인)

위 원 : 박 주 용 (인)

위 원 : 손 경 호 (인)

2004年 1月

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과 배 준 영

# 목 차

Abstract .....	III
Nomenclature .....	IV
List of Tables .....	VII
List of Figures .....	VIII
1. 서 론 .....	1
2. 선박조종운동의 수학모델 .....	2
2.1 조종운동방정식 .....	2
2.2 주선체에 작용하는 유체력 .....	5
2.2.1 선속이 0이 아닌 경우( $V \neq 0$ ) .....	5
2.2.2 선속이 0인 경우( $V = 0$ ) .....	5
2.3 프로펠러에 기인하는 유체력 .....	7
2.4 조타에 기인하는 유체력 .....	11
2.5 풍압력과 예항력 .....	13
2.6 주기관 회전수 및 조타기의 응답 모델 .....	15
3. 충돌재현 시뮬레이터의 개요 .....	16
3.1 시뮬레이터의 구성 .....	16
3.2 시스템 사양 .....	19
3.3 각 구성요소들의 기능과 역할 .....	20
3.3.1 시스템총괄부 .....	20
3.3.2 운동계산부 .....	21
3.3.3 제어입력부 .....	22

3.3.4	항해정보출력부 .....	23
3.3.5	3차원시계재현부 .....	24
3.3.6	2차원디스플레이 .....	25
4.	3차원 영상 모델링 .....	26
5.	충돌사고 과정의 재현 실험 및 사고 원인 분석 .....	28
5.1	공시선박의 재현 .....	28
5.1.1	Ship A의 재현 .....	28
5.2.1	Ship B의 재현 .....	28
5.2	사고해역의 재현 .....	33
5.3	충돌과정의 재현 실험 .....	34
5.4	가상시나리오 실험 .....	39
5.4.1	가상시나리오1 .....	39
5.4.2	가상시나리오2 .....	40
5.5	실험 결과 .....	42
6.	결 론 .....	43
	참고문헌 .....	44

## Abstract

Recently there is a growing tendency that some ships have become larger, faster and more specialized than ever before. So the environment of ship operation has grown worse and collision risk will be higher especially in congested waterways or in nearby harbour areas. Collision accident of large ships often leads to serious oil pollution on the sea. To examine the cause of collision accident may be necessary to prevention against another similar new one.

In this paper, the author discusses construction of ship manoeuvring simulator system used for reproducing collision phenomenon and for examining the cause of collision accident. And a simulator experiment, based on real collision accident, has been carried out as a case study and cause of accident has been examined.

## Nomenclature

$A_R$	Submerged area of rudder
$B$	Breadth of ship
$D$	Propeller diameter
$d$	Mean draft
$H_R$	Rudder height
$I_{zz}$	Moment of inertia about the $z$ axis
$J_{zz}$	Added moment of inertia about the $z$ axis
$L$	Length between perpendiculars of ship
$L_{OA}$	Length overall of ship
$m$	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 propeller
$N_R$	Yaw moment induced by rudder
$N_T$	Yaw moment induced by tug
$N_W$	Yaw moment induced by wind

$P$	Propeller pitch
$r$	Angular velocity
$u$	Longitudinal component of ship velocity
$u^*$	Longitudinal component of absolute ship velocity
$V$	Resultant ship speed
$V_C$	Current velocity
$v$	Lateral component of ship velocity
$v^*$	Lateral component of absolute ship velocity
$X$	Surge force
$X_H$	Surge force acting on a hull
$X_P$	Surge force induced by propeller
$X_R$	Surge force induced by rudder
$X_T$	Surge force induced by tug
$X_W$	Surge force induced by wind
$x_G$	$x$ coordinate of center of gravity
$Y$	Sway force
$Y_H$	Sway force acting on a hull
$Y_P$	Sway force induced by propeller
$Y_R$	Sway force induced by rudder
$Y_T$	Sway force induced by tug
$Y_W$	Sway force induced by wind

$\alpha$	$x$ coordinate of center of $m_y$
$\beta$	Drift angle
$\delta$	Rudder angle
$\psi$	Heading angle
$\psi_c$	Current angle
$\cdot$	Time derivative
$\prime$	Non-dimensional sign



## List of Table

Table 1	Specification of present simulator .....	19
Table 2	Principal dimensions .....	29
Table 3	Hydrodynamic derivatives and other coefficients .....	30

## List of Figures

Fig. 1	Co-ordinate system and definition of symbols .....	2
Fig. 2	Thrust coefficient $C_T^*$ for B4-70 screw with $P/D = 1.0$ by four quadrant measurement in open water .....	9
Fig. 3	Thrust coefficient $K_T$ for Ship A .....	9
Fig. 4	Unbalanced hydrodynamic forces for container ship model .....	10
Fig. 5	Towing arrangements .....	14
Fig. 6	Schematic of system configuration .....	17
Fig. 7	Photographs of simulator bridge and control console .....	18
Fig. 8	Network connection .....	18
Fig. 9	Instruction Station .....	20
Fig. 10	Motion Solver .....	21
Fig. 11	Control Panel .....	22
Fig. 12	Navigational Indicator .....	23
Fig. 13	Visual field of 3 dimensional View .....	24
Fig. 14	2D Display and Radar .....	25
Fig. 15	Image generation procedure for terrain and ship .....	26
Fig. 16	Ship A and Ship B Turning Test .....	31
Fig. 17	3 dimensional modeling of Ship A and Ship B .....	32
Fig. 18	3 dimensional modeling of Pohang-harbour and surrounding area .....	33
Fig. 19	Real trajectories and positions of both ships for about 10 minutes just before collision accident .....	34
Fig. 20	Comparison of trajectories and positions of both ships by simulator experiment on reproducing collision accident with real ones .....	35
Fig. 21	Initial and Collided view between Ship A and Ship B .....	36
Fig. 22	Changes in rudder angles during simulator on experiment reappearing collision accident .....	38
Fig. 23	Simulator experiment based on scenario (1) .....	39
Fig. 24	Simulator experiment based on scenario (2) .....	41

## 1. 서론

최근 선박이 대형화, 고속화 경향을 보이는 가운데 항구 근처나 혼잡한 항로 등과 같은 곳에서 선박의 운항 환경은 더욱 악화되고 있다. 또한 연안에서 선박의 충돌사고는 심각한 해양환경오염을 발생시킨다. 이러한 곳에서 선박의 충돌사고를 미연에 방지함으로써 해양환경을 보호하기 위해서는 이미 발생한 충돌사고의 원인 분석이 필요하다. 이에 따라 해난사고의 원인을 규명하기 위한 노력은 지금까지 수없이 시도되어 왔으나, 주로 해난사고와 관련한 인적과실(Human error) 면을 중요시 해 왔으며, 해난사고의 당시 상황을 실시간으로 재현하여 해난사고와 관련된 물리적 요소들을 함께 검토 분석한 예는 드물다.

본 시뮬레이터는 시스템 모두를 한국해양대학교 선박조종운동연구실에서 자체 개발하였기 때문에, 물리적 요소들 즉, 환경특성(지형지물, 시정, 항로, 상대선의 거동 등), 선박특성(자선 및 상대선의 선종, 선체형상 등) 및 선박조종특성(선회반경, 변침 및 보침성능, 저속시 성능 등) 등을 자유롭게 변화시키는 것이 가능하다. 따라서 임의의 상황에 맞게 적절히 물리적 요소들을 변화시킴으로써 다양한 선박의 조종시뮬레이션 실험을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 충돌재현 시뮬레이터의 개발 및 활용에 대해서 논하고자 한다. 먼저 시스템의 구성을 위한 선박조종운동의 수학적모델에 대해서 논의해 보기로 한다. 그리고 시뮬레이터의 전체적인 시스템 구성에 관해 논의를 한 후 구축된 시스템에서 실제 선박의 선교 역할을 담당하는 시뮬레이터 브릿지(Simulator Bridge)에 설치되어 있는 각종 항해 장비(네비게이션 인디케이터(Navigational Indicator)들, 조타륜(Steering Wheel), 엔진 텔레그래프(Engine Telegraph), 사이드 쓰러스터(Side Thruster), 자이로-컴퍼스 리피터(Gyro-compass Repeater) 등)와 시뮬레이터를 구성하는 각 컴퓨터들의 역할과 통신방법에 대해서도 간략하게 언급하기로 한다. 그리고 3차원 모델(지형, 선박 등)의 생성방법 및 영상재현기법에 대해서 검토한다. 마지막으로 이렇게 구축된 충돌재현 시뮬레이터를 이용하여 2002년에 포항 앞바다에서 실제로 발생한 “Ship A와 Ship B의 충돌사고”에 대한 원인 조사 분석을 통해, 본 시뮬레이터가 충돌재현 시뮬레이션 실험 및 충돌사고의 원인 분석에 유용하게 사용될 수 있음을 확인한다.

## 2. 선박조종운동의 수학모델

### 2.1 조종운동방정식

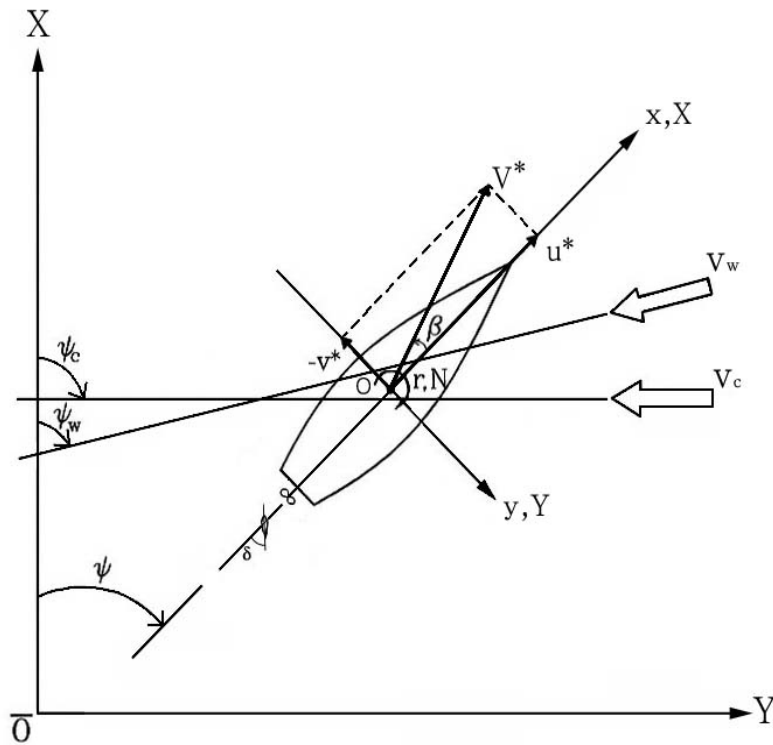


Fig. 1 Co-ordinate system and definition of symbols

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

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

$$I_{zz} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N$$

여기서  $m$ 은 선체의 질량이고,  $I_{zz}$ 는  $z$ 축 주위의 관성모멘트이다.  $u, v, r$ 은 각각 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[2]을 좌변에 고려하고, 우변에는 부가질량력을 제외한 유체력으로서 MMG모델[3]을 적용하면 조종운동 수학모델은 다음과 같이 표현된다. 단, 관례에 따라 Munk 모멘트 등 일부 부가질량력은 우변의 유체력항에 포함시킨다.

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

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,  $a$ 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  $\Psi_c$ 를 Fig. 1과 같이 정의할 때 대수속도와 대지속도의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= u^* + V_c \cos(\Psi_c - \Psi) \\ v &= v^* + V_c \sin(\Psi_c - \Psi) \\ \dot{u} &= \dot{u}^* + V_c r \sin(\Psi_c - \Psi) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{v} = \dot{v}^* + V_c r \cos(\Psi_c - \Psi)$$

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

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u}^* &= (m + m_y) v r + (m x_G + m_y a) r^2 \\ &\quad - (m + m_x) V_c \sin(\Psi_c - \Psi) \\ &\quad + X_H + X_P + X_R + X_W + X_T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (m + m_y) \dot{v}^* + (m x_G + m_y a) \dot{r} \\ &= - (m + m_x) u r + (m + m_y) V_c r \cos(\Psi_c - \Psi) \\ &\quad + Y_H + Y_P + Y_R + Y_W + Y_T \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} + (m x_G + m_y a) \dot{v}^* \\ &= - m x_G u r + (m x_G + m_y a) V_c r \cos(\Psi_c - \Psi) \\ &\quad + N_H + N_P + N_R + N_W + N_T \end{aligned}$$

## 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 수학적모델로서 추정하는 것은 부적합하다. 본 논문에서는 주선체에 작용하는 유체력의 저속시 수학적모델로서 문헌[4]의 결과를 이용하였으며 다음과 같다.

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

### 2.2.1 선속이 0이 아닌 경우( $V \neq 0$ )

$$\begin{aligned}
 X_H &= 0.5\rho LdV^2\{X_{uu}'u|u| + X_{vr}'v'r\} \\
 Y_H &= 0.5\rho LdV^2\{Y_v'v' + Y_{ur}'u'r' \\
 &\quad + Y_{vv}'v|v| + Y_{vr}'v|r| + Y_{ur}'u'r|r|\} \\
 N_H &= 0.5\rho L^2dV^2\{N_v'v' + N_{uv}'u'v' + N_r'r' \\
 &\quad + N_{vvr}v'^2r' + N_{uvr}u'v'r'^2 + N_{rr}'r|r|\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $L$ 과  $d$ 는 각각 선체길이와 평균흘수이다. 그리고 운동변수와 유체력의 무차원화 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V &= \sqrt{u^2 + v^2}, \quad u' = u/V \\
 v' &= v/V, \quad r' = r \cdot L/V \\
 X_{H'} &= X_H/0.5\rho LdV^2 \\
 Y_{H'} &= Y_H/0.5\rho LdV^2 \\
 N_{H'} &= N_H/0.5\rho L^2dV^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

### 2.2.2 선속이 0인 경우( $V = 0$ )

선속이 0인 경우의 운동은 선박이 그 장소에서 회전운동만 하게 되므로, 이 때 선

체에 작용하는 유체력은 다음과 같다.

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

상기 모델은 저속영역에서뿐만 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[5]과 일치하게 된다. 그러나 극단적인 후진, 횡이동 등의 경우에는 오차가 있을 것으로 사료되지만, 이 때에는 조종운동으로 인한 선박의 이동량이 작기 때문에 무난할 것으로 생각된다. Hirano[6]는 저속시 조종운동 추정을 위한 수학모델로서 상기 모델과 거의 같은 실용적 모델을 제안하고 있으며, Mikelis[7]도 선박의 후진운동 추정을 위한 수학모델로서 의거 유사한 모델을 제안하고 있다.



### 2.3 프로펠러에 기인하는 유체력

프로펠러에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_p &= (1 - t) T \\ Y_p &= \rho n^2 D^4 Y_p^* \\ N_p &= \rho n^2 D^4 L N_p^* \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $t$ 는 추력감소계수,  $T$ 는 추력,  $n$ 은 프로펠러 회전수,  $D$ 는 프로펠러 원반의 직경을 나타낸다.

프로펠러의 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 조종시의 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[8].

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

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

$$u_p = u(1 - w_p) \quad (11)$$

여기서  $w_p$ 는 프로펠러에 유입하는 흐름의 평균속도를 나타낸다. 그리고  $w_{p0}$ 는 프로펠러 위치에서의 유효반류계수를 나타낸다.

i) ( $u > 0$ )인 경우

$$w_p = w_{p0} \exp[-4.0(v' + x_p' r)^2] \quad (12)$$

ii) ( $u \leq 0$ )인 경우

$$w_p = 0 \quad (13)$$

여기서  $w_{p0}$ 는 정상 직진시의  $w_p$ 의 값,  $x_p'$ 는 프로펠러 위치의  $x$ 좌표의 무차원치를 나타낸다.

식(10)에서의  $A(\theta)$ ,  $B(\theta)$ 는 프로펠러 단독시험에 의해서 구하거나 van Lammeren[8]의 실험 자료를 이용할 수 있다. 그리고  $\theta$ 는 유체동역학적 피치각(hydrodynamic pitch angle)으로서 다음과 같이 정의된다.

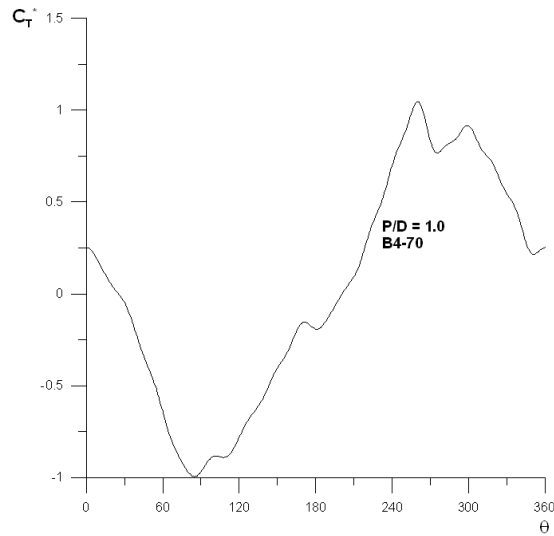
$$\theta = \tan^{-1}(u_p/0.7\pi nD) \quad (14)$$

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

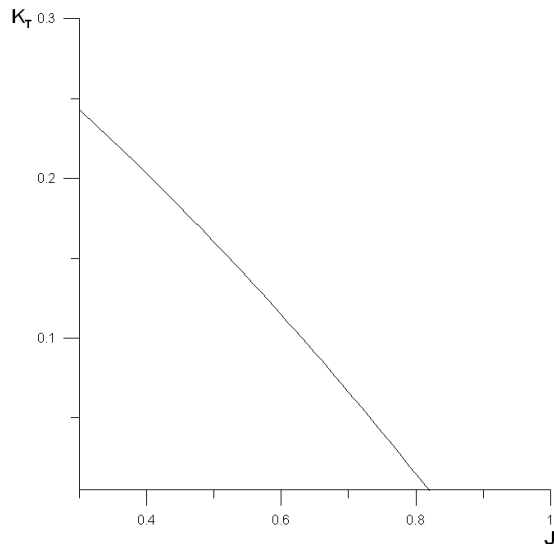
$$\begin{aligned} T &= K_T \rho n^2 D^4 \\ K_T &= a_1 + a_2 J + a_3 J^2 \end{aligned} \quad (15)$$

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 Lammeren의 B-Screw series 프로펠러 특성[8]으로부터 구할 수 있다. van Lammeren방법에 의한  $C_T^*$ ,  $K_T$ 의 추정예를 Fig. 2, 3에 나타낸다.



**Fig. 2** Thrust coefficient  $C_T^*$  for B4-70 screw with  $P/D = 1.0$  by four-quadrant measurement in open water



**Fig. 3** Thrust coefficient  $K_T$  for Ship A

프로펠러 회전에 의한 횡방향 유체력  $Y_p$ 와 회두모멘트  $N_p$ 에서 유체력계수  $Y_p^*$ 와  $N_p^*$ 는 제 2상한( $u \geq 0, n \leq 0$ ) 영역에서만 고려되며,  $J_S(J_S = u_p/nD)$ 의 함수로써 정리될 수 있다. 프로펠러 회전에 의한 횡방향 유체력과 회두모멘트가 제 2상한에서만 고려되는 이유는, 프로펠러의 역회전에 의해서 선미 부분이 프로펠러 후류의 영향을 받게 되며 선체 좌우현에서의 비대칭 압력에 의해 불평형 유체력이 발생되기 때문이다. 그리고  $J_S$ 의 함수로써 표시한  $Y_p^*, N_p^*$ 의 크기와 경향은 선미 형상에 따라서 약간 차이가 난다. 컨테이너 선형에 대한  $Y_p^*, N_p^*$ 의 측정 예로서 Fujino의 실험 결과[9]를 Fig. 4에 보인다.

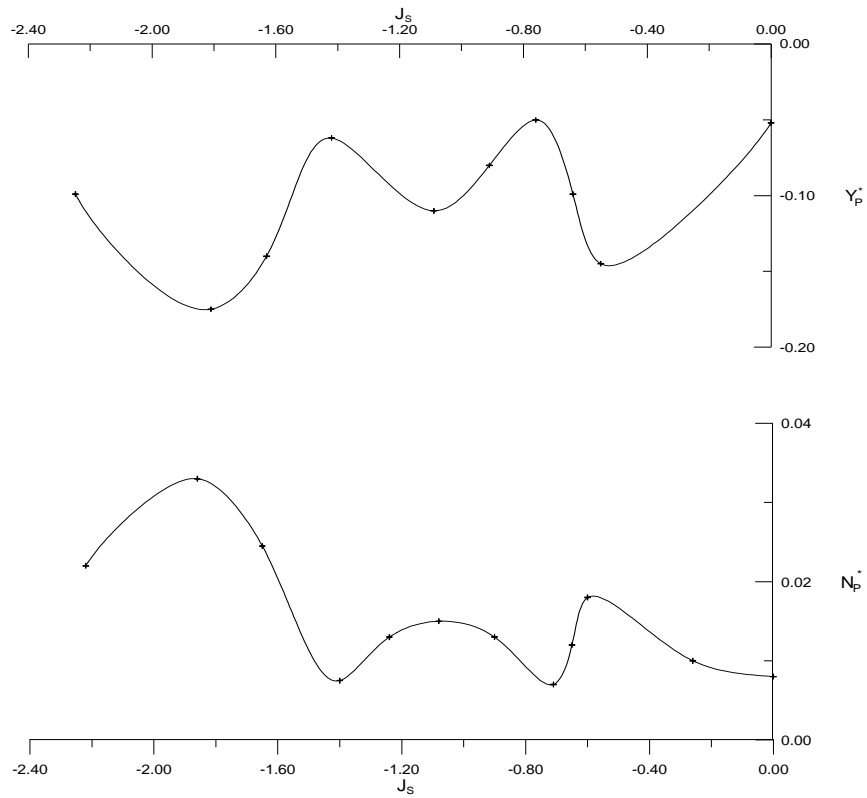


Fig. 4 Unbalanced hydrodynamic forces for container ship model

## 2.4 조타에 기인하는 유체력

조타에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\
 Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\
 N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta
 \end{aligned} \tag{16}$$

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,  $\alpha_R$ 은 타에 유입하는 흐름의 유효양각,  $f_a$ 는 타수직력계수의 경사이다.  $f_a$ 에 관해서는 Fujii[10]식을 이용한다. 식(17)에서 타에 유입하는 흐름의 유효양각  $\alpha_R$ 과 유효유입속도  $V_R$ 등은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 각각 다음과 같이 표시된다[11].

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

$$\begin{aligned}
 \alpha_R &= \delta - \tan^{-1}(v_R / u_R) \quad \text{단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ \\
 V_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \\
 u_R &= \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta k)s + \{1 - \eta k(2 - k)\}s^2} \\
 v_R &= -\varepsilon_R (v + l_R r) \\
 \varepsilon &= (1 - w_R) / (1 - w_P), \quad k = 0.6 / \varepsilon \\
 w_R &= w_{R0} w_P / w_{P0} \\
 \eta &= D / H_R \\
 s &= 1 - u_P / (nP)
 \end{aligned} \tag{18}$$

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.

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

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,  $H_R$ 는 타의 높이,  $P$ 는 핏치를 나타낸다.

## 2.5 풍압력과 예항력

바람에 의한 힘과 모멘트는 Isherwood의 회귀분석에 의한 추정식[12]을 이용하여 구한다. Isherwood 추정식에서 얻어지는 계수를  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_N$ 이라 하면 바람에 의한 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_W &= C_X(\Psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_T \\ Y_W &= C_Y(\Psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L \\ N_W &= C_N(\Psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L L_{OA} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} C_X \\ C_Y \\ C_N \end{pmatrix} = \sum_{j=0}^5 \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \\ C_j \end{pmatrix} \cdot I_j + \begin{bmatrix} A_6 \cdot M \\ B_6 \cdot A_{SS} / A_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

단,

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

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

$L_{OA}$  : 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  $\Psi_A$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} V_A^2 &= \sqrt{u_A^2 + v_A^2} \quad , \quad \Psi_A = \tan^{-1}(v_A / u_A) \\ u_A &= V_A \cos \Psi_A = u^* + V_W \cos(\Psi_W - \Psi) \\ v_A &= V_A \sin \Psi_A = v^* + V_W \sin(\Psi_W - \Psi) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서  $V_W, \Psi_W$ 는 절대풍속과 절대풍향각을 나타낸다.

다음으로 예선에 의한 예항력과 모멘트는 다음과 같이 계산된다. 예선의 배치를 Fig. 2와 같이 상정하고 고정점에서 예항력이 일정한 방향으로만 작용하는 것으로 가정할 때,  $X_T, Y_T, N_T$ 는 다음과 같다.

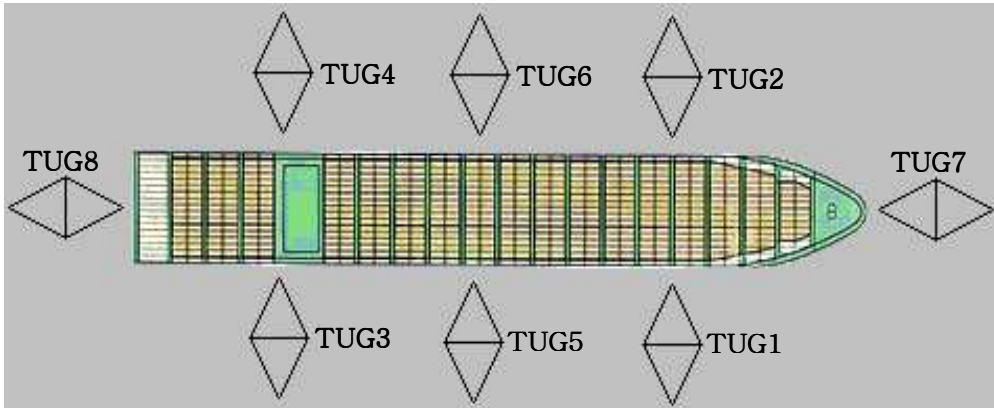


Fig. 5 Towing arrangements

$$\begin{aligned} X_T &= F_{t1} - F_{t8} \\ Y_T &= -F_{t1} - F_{t3} - F_{t5} + F_{t2} + F_{t4} + F_{t6} \\ N_T &= (F_{t2} - F_{t1}) l_f + (F_{t3} - F_{t4}) l_a \end{aligned} \quad (26)$$

여기서  $F_{t1}, F_{t2}, \dots$ 는 예선의 추력을 나타내고,  $l_a$ 와  $l_f$ 는 선수와 선미에 위치한 예선의 선체중양으로부터의 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[11]. 따라서 수학모델은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_M \dot{n} + n = \begin{cases} n^* : (n^* < 0 \text{ or } n_i < n^*) \\ n_i : (0 \leq n^* \leq n_i) \end{cases} \quad (27)$$

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 토오크를 고려하여 다음 식으로 근사 표시된다[11].

$$n_i = \frac{0.7 u(1 - w_p)}{P} \quad (28)$$

조타기의 응답 모델은 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{cases} T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* & (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{max}|) \\ \dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{max}| & (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{max}|) \end{cases} \quad (29)$$

여기서

$$T_E = 2.5 \text{ sec} ; \text{시정수}$$

$$\dot{\delta}_{max} = 3.0 \text{ deg/sec} ; \text{최대타각속도}$$

### 3. 충돌재현 시뮬레이터의 개요

조중운동 수학모델을 적용하여 충돌재현 시뮬레이터의 시스템을 보완 및 구축하였다. 본 시스템의 구성과 각 구성요소들의 기능은 다음과 같다.

#### 3.1 시뮬레이터의 구성

본 논문에서 개발 및 보완된 충돌재현 시뮬레이터(Collision Reproducing Simulator)의 전체적인 시스템 구성을 Fig. 6에 보이고 있다. 구축된 시뮬레이터는 크게 시뮬레이터 브릿지(Simulator Bridge)와 영상시스템(Visual System) 및 컨트롤 콘솔(Control Console)부분으로 구성되어 있다. 시뮬레이터 브릿지는 실제 선박의 선교(Bridge)를 재현한 부분으로서 브릿지 내부에는 조타륜(Steering Wheel), 사이드 쓰러스터(Side Thruster), 엔진 텔레그래프(Engine Telegraph), 자이로-컴퍼스 리피터(Gyro-compass Repeater), 각종 항행 정보를 표시하는 네비게이션 인디케이터(Navigational Indicators)들, 레이더(Radar), 브릿지 모니터(Bridge Monitor)로 구성된다. 영상시스템(Visual System)은 다섯 개의 LCD 프로젝터(Liquid Crystal Display Projector)와 각각의 프로젝터에 대응하는 120인치의 대형 스크린(Screen)으로 이루어진다. 또한, 컨트롤 콘솔에는 자선(Own Ship)을 위한 자선용 컨트롤 콘솔과 충돌재현 시뮬레이션(Collision simulation)을 위한 상대선(Target ship)용 콘솔이 별도로 설치되어 있으며, 모든 PC들의 어플리케이션(Application)들을 원격 제어하고 시뮬레이션 환경을 설정하는 시스템 총괄부(Instructor station)와 기타 항해정보를 모니터 상에 표시해주는 컴퓨터(Navigational Information), tug 보트의 마력 및 위치 등을 설정할 수 있는 tug 보트 컨트롤러(Tug boat controller) 등으로 구성되어 있다.

특히 본 시뮬레이터는 자선과 상대선을 위한 별도의 콘솔 및 브릿지를 가지고 동시에 두 선박을 실시간으로 조종 제어할 수 있도록 구성하였다. 따라서 두 선박간의 충돌사고의 재현 및 거동 분석에 유용하게 활용될 수 있다. 자선은 시뮬레이터 브릿지와 자선용 컨트롤 콘솔 모두에서 조종 제어 가능하며, 타선은 시뮬레이터 브릿지가 별도로 설치되어 있지 아니하므로 컨트롤 콘솔의 조종 제어(Operation panel)용 컴퓨터에서만 선박을 조종 제어할 수 있도록 구성되어 있다.

Fig. 7에 시뮬레이터 브릿지의 내부와 외부에서의 사진 및 자선용과 타선용 컨트롤 콘솔의 모습을 보인다.

Fig. 8에 나타낸 것과 같이 본 충돌재현 시뮬레이터에서는 각 구성요소들 간의 데이터 전송을 위하여 분산처리 네트워크 방식(distributed data processing network

technique)을 채택[13]하여 서로 통신을 한다. 효율적인 데이터 전송을 위해 각 구성 요소들의 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[14]. UDP 방식은 신뢰성이 보장되지 않고 비연결적인 데이터그램(Datagram) 전송 구조를 가지고 있으므로 TCP 방식보다는 데이터 전송이 빠르다고 할 수 있다[14]. 따라서 고신뢰성의 TCP 방식과 빠른 데이터 전송의 UDP 방식을 어떤 구성요소 사이에 적용시키느냐는 것이 시뮬레이터의 구성에 있어서 중요하다. 본 충돌재현 시뮬레이터에서는 2차원조감도와 3차원시계재현부는 정확한 데이터 전송도 중요하지만 그보다 실시간으로 영상을 재현해야 하기 때문에 빠른 데이터 전송을 지원하는 UDP 방식을 채택하여 각각 운동계산부와 연결하였다. 그리고 나머지 구성요소들 간의 연결은 빠른 데이터 전송보다는 데이터의 신뢰성이 더욱 중요하게 요구되므로 TCP 방식을 채택하였다. 또한 시뮬레이터에서 서버역할을 하는 시스템 총괄부의 경우 모든 컴퓨터와 TCP 방식으로 연결하여 네트워크 접속상태를 확인할 수 있게 하였다.

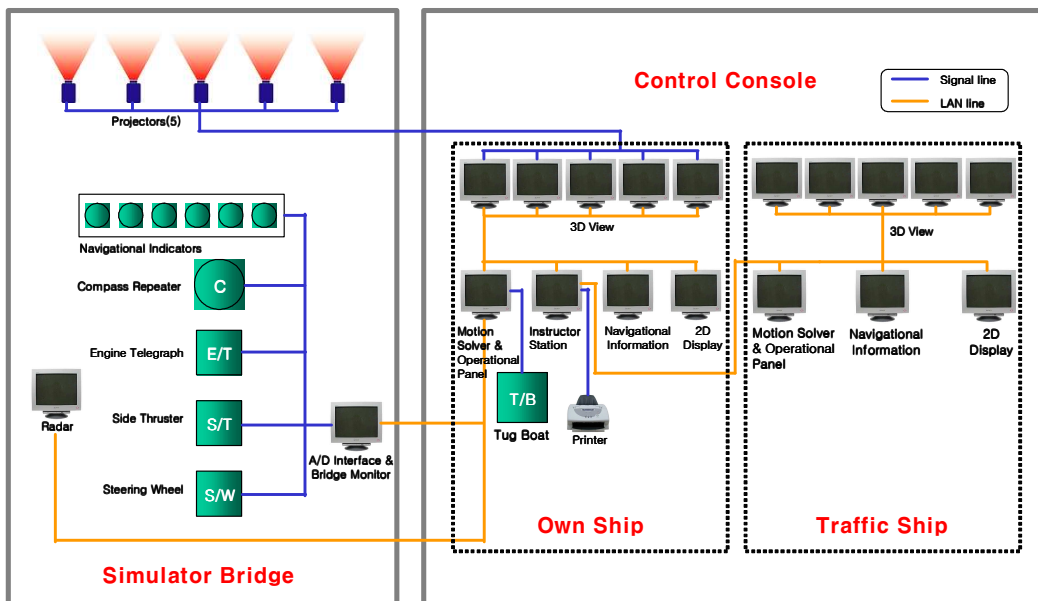


Fig. 6 Schematic of system configuration



Inside and outside of bridge



Control console for own ship and target ship

Fig. 7 Photographs of simulator bridge and control console

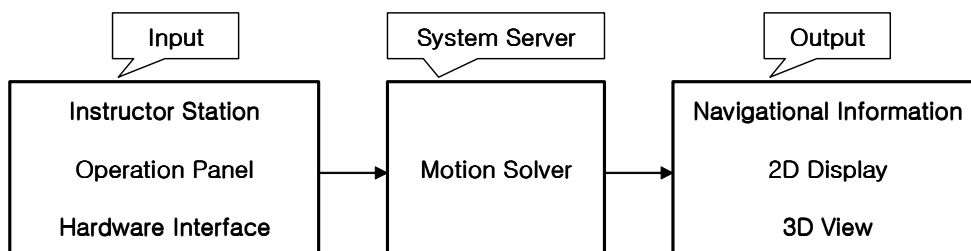


Fig. 8 Network connection

### 3.2 시스템의 사양

Table 1은 본 충돌재현시뮬레이터 시스템의 사양을 나타내고 있다.

실시간 시뮬레이션에 있어서 움직이고 있는 물체에 대해 부드럽고 연속적인 영상표현은 아주 중요하며 이를 결정하는 요소가 바로 화면 갱신속도(Frame rate)이다. 본 시뮬레이터에서는 화면 갱신속도를 최소 30 frame/sec로 설정하였다.

**Table 1** Specification of present simulator

<b>Bridge dimension</b>	W5.1m × D3.5m × H2.3m
<b>Display system</b>	Front projection system LCD Projector : 5 channels (Max. 3200 ANSI lumens) Flat screen(120") : 5 channels
<b>Field of view</b>	Horizontal : 175 degrees Vertical : 26.3 degrees
<b>Image generation system</b>	Hardware : Pentium 4, 2.0 GHz Software : Vega NT (Multigen-Paradigm Inc.) Frame rate : 30 frame/sec

### 3.3 각 구성요소들의 기능과 역할

#### 3.3.1 시스템 총괄부

시스템 총괄부(Instructor Station)는 시스템에서 서버 역할을 담당하면서 다음과 같은 3가지의 기능을 수행한다.

- ① 선박과 항만 데이터베이스(선종, 위치, 선속 및 항만 설정) 관리
- ② 환경(바람, 조류, 주야, 날씨 등)조건의 설정 및 관리
- ③ 모든 어플리케이션(application)들을 제어

Fig. 9은 시스템 총괄부의 어플리케이션 실행 예를 보인다.

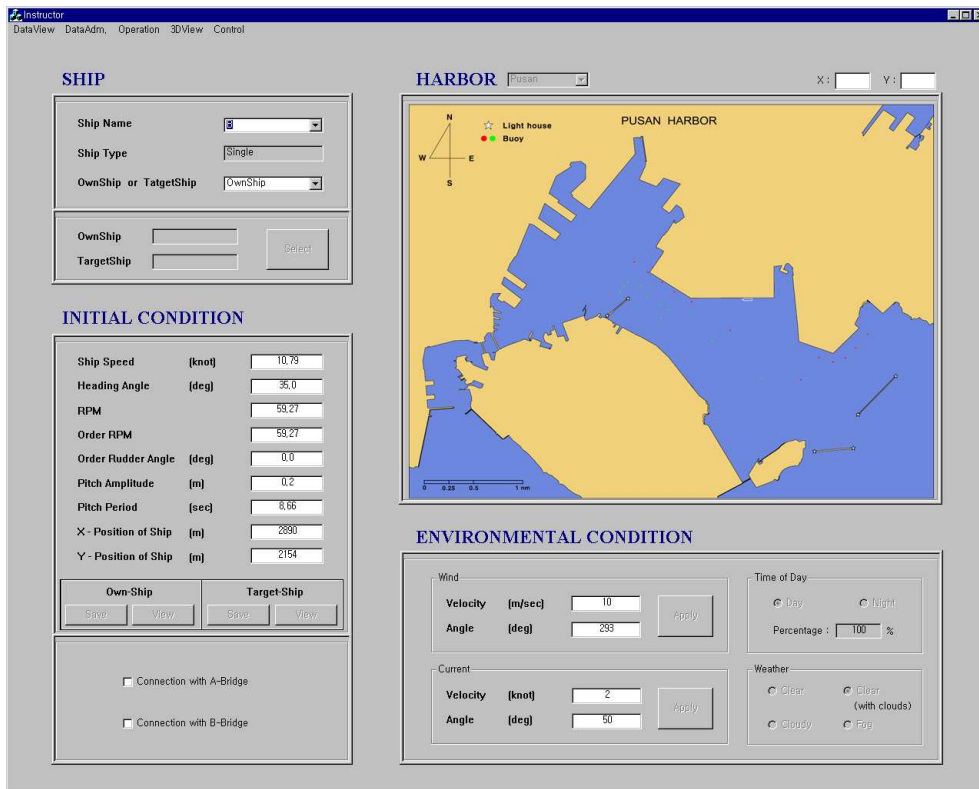


Fig. 9 Instruction Station

### 3.3.2 운동계산부

운동계산부(Motion Solver)에서는 교관용 컴퓨터(Instructor Station)에서 선택한 자선(Own Ship), 타선(Target Ship), 기타 환경조건에 대한 데이터를 기반으로 하여 컨트롤콘솔(Control Console)로부터 선박의 초기위치나 기타 설정(프로펠러회전수(RPM), 타각(Rudder Angle), 터그 보트(Tug Boat)등) 등의 데이터를 전송 받아 자선 및 타선의 조종운동 수학모델을 일정 시간간격으로 계산한다. 그리고 계산 결과는 3차원시계재현부(3D View), 2차원조감도(2D Display), 레이더(Radar) 및 네비게이션 인디케이터(Navigational Indicator)로 보내진다.

본 시뮬레이터에서는 쓰레드를 사용하여 평균 0.0045초 간격으로 운동방정식을 계산하여 0.03초 간격으로 데이터를 전송한다.

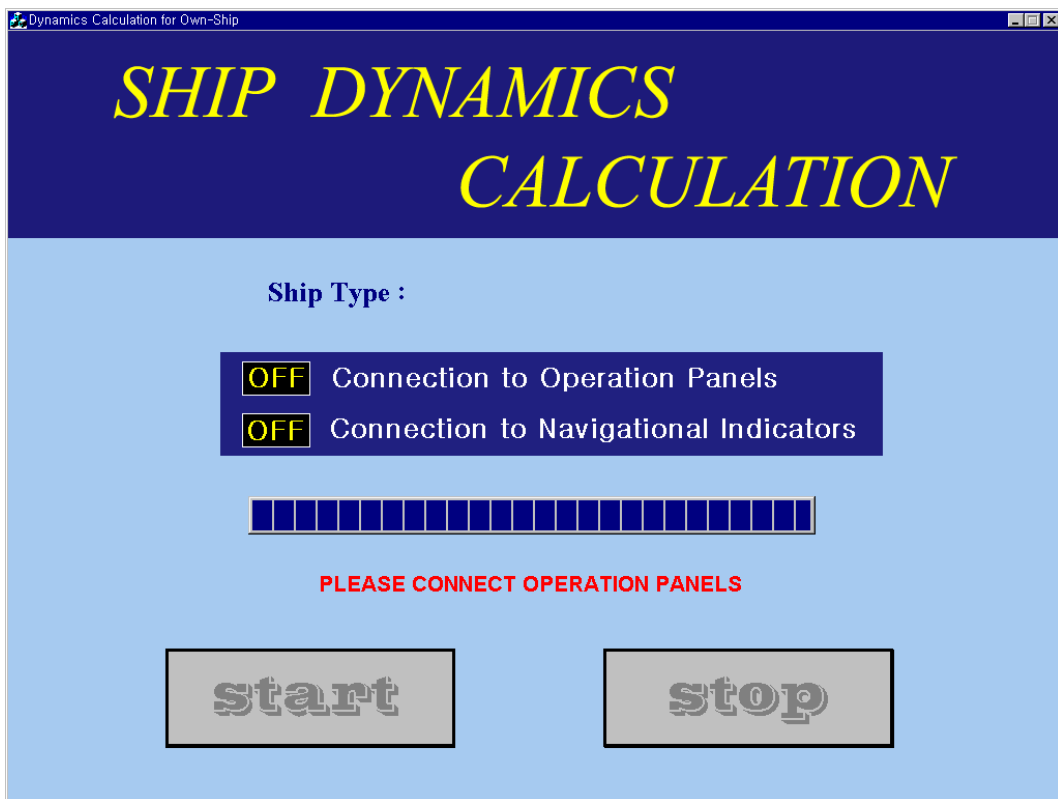


Fig. 10 Motion Solver

### 3.3.3 제어입력부

제어입력부(Control Console)는 타, 주기관 그리고 예선의 제어를 담당한다. 본 시스템은 브릿지의 향해 장비(조타륜(Steering Wheel), 엔진 텔레그래프(Engine Telegraph), 터그 보트 컨트롤러(Tug boat Controller)등)로 선박을 조종할 수 있는 브릿지 모드와 제어입력부에서 선박을 제어할 수 있는 모니터 모드를 지원한다. Fig. 11은 모니터 모드시 선박을 제어할 수 있는 제어입력부 실행시의 모습을 보이고 있다. 본 어플리케이션을 통하여 마우스나 키보드를 사용하여 선박을 조종 제어할 수 있다.

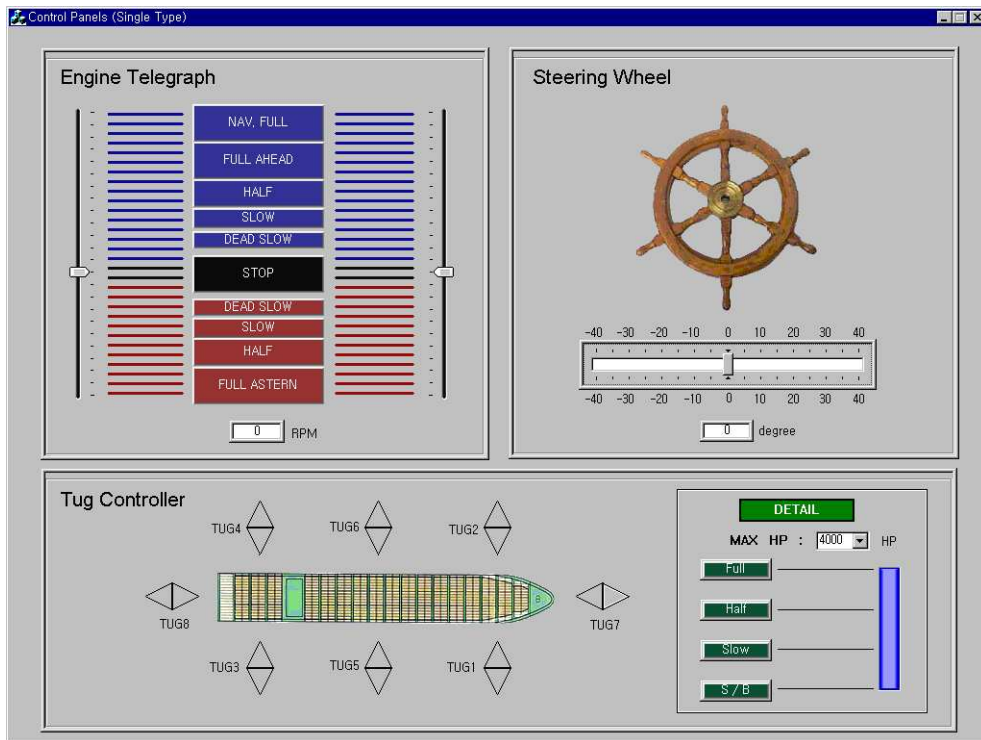


Fig. 11 Control Panel



### 3.3.4 항해정보출력부

Fig. 12는 항해정보출력부(Navigational Indicator)로서 자선에 대한 항해정보를 아날로그와 디지털 게이지를 통해서 모니터 상에 제공해주는 역할을 한다. 각 게이지들은 조류(Current)의 방향 및 속도, 자선의 침로각(Heading Angle), LOG 및 GPS속도, 회두각속도(Turn Rate), 표류속도(Trans Speed) 및 표류각(Drift Angle), 타각(Rudder Angle), 바람(Wind)의 방향 및 속도, 주기관의 회전수(Propeller RPM) 등에 대한 항해에 필요한 기본적인 정보를 모니터 상에 표시하여 시뮬레이션 시 선박 운항자의 편의를 도모한다.

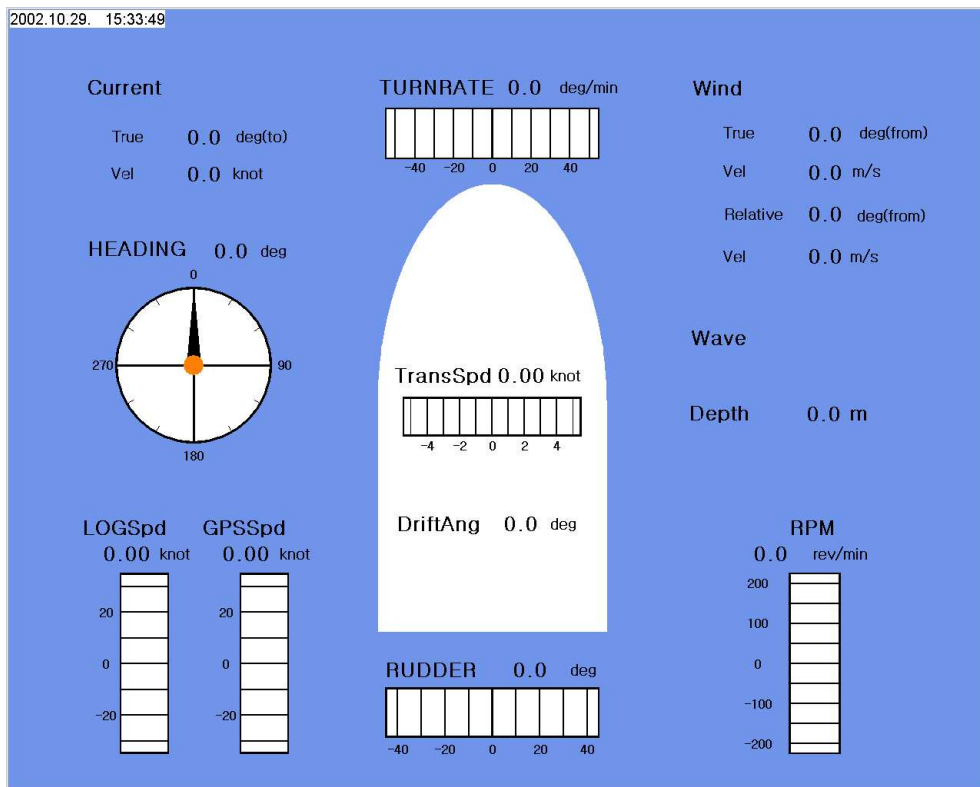


Fig. 12 Navigational Indicator

### 3.3.5 3차원시계재현부

3차원시계재현부는 선박조종과 관련된 시계정보를 3차원 영상을 통하여 선박 운항자에게 보여주는 역할을 수행하는 가장 중요한 구성요소중의 하나로서 5대의 PC와 각각의 PC에 대응하는 5개의 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 수평시야각  $35^\circ$ , 수직시야각  $26.3^\circ$ 의 시야범위를 가지며, 총 수평시야각  $175^\circ$ , 수직시야각  $26.3^\circ$  (상방향으로  $10^\circ$ , 하방향으로  $16.3^\circ$ )의 시야범위를 이루고 있다. 운항자의 위치는 함교내의 자이로 컴퍼스 리피터(gyro-compass repeater)를 기준으로 하여 설정하였다. Fig. 13은 3차원시계재현부의 스크린 시야범위를 나타내고 있다.

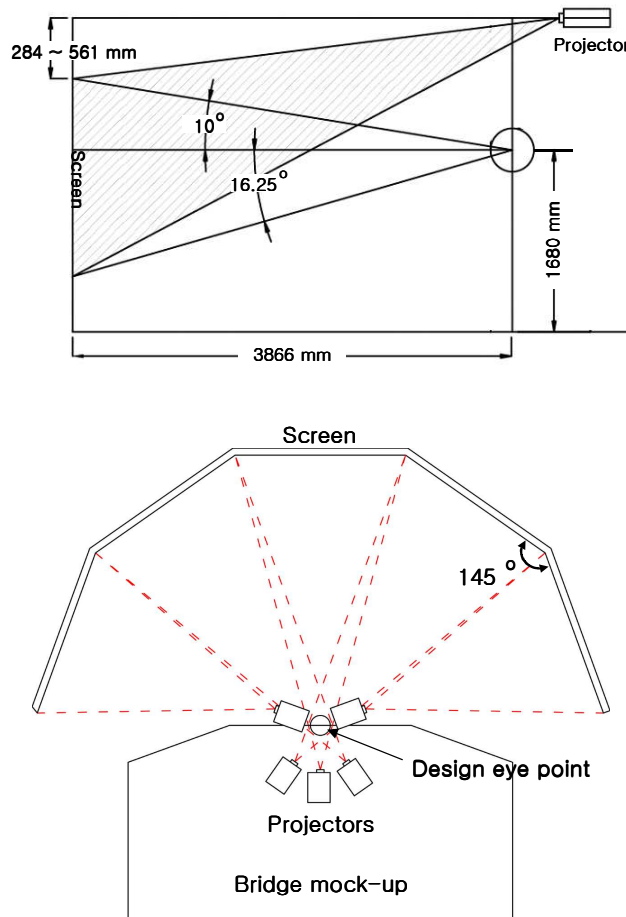


Fig. 13 Visual field of 3 dimensional View

### 3.3.6 2차원디스플레이

Fig. 14에 나타낸 것과 같이 2차원조감도(2D Display)는 2차원 지형, 자선과 타선의 위치에 대한 정보를 보여주는 레이더(Radar)의 기능을 수행하는 어플리케이션이다.

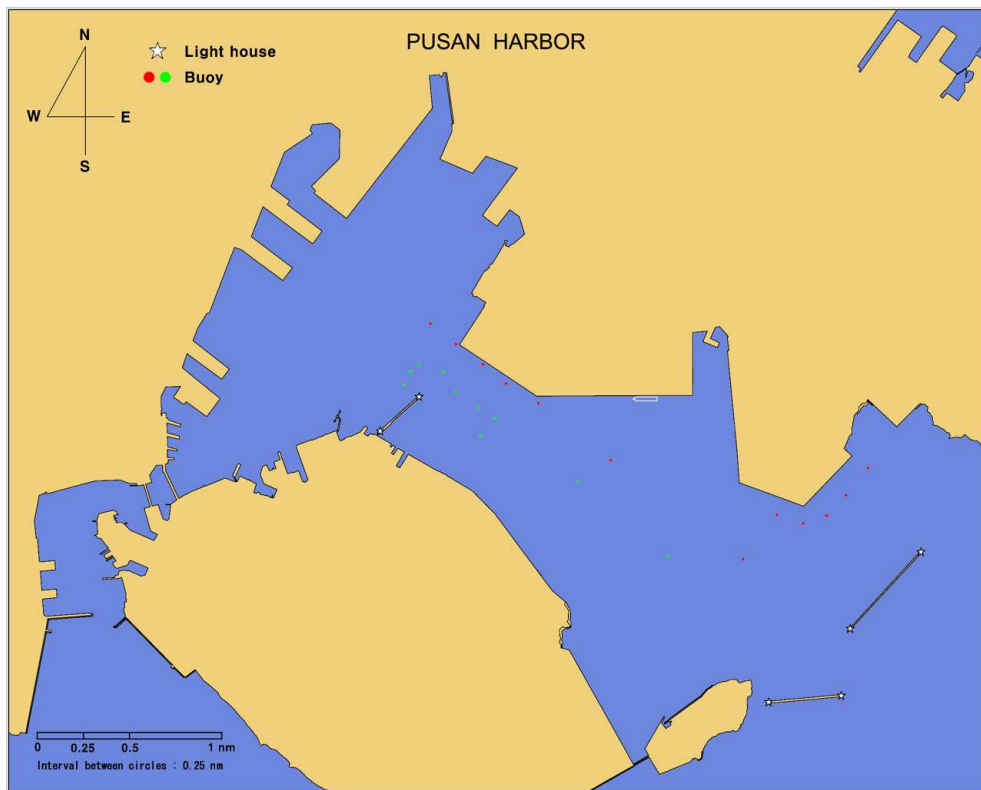


Fig. 14 2D Display and Radar

#### 4. 3차원 영상 모델링

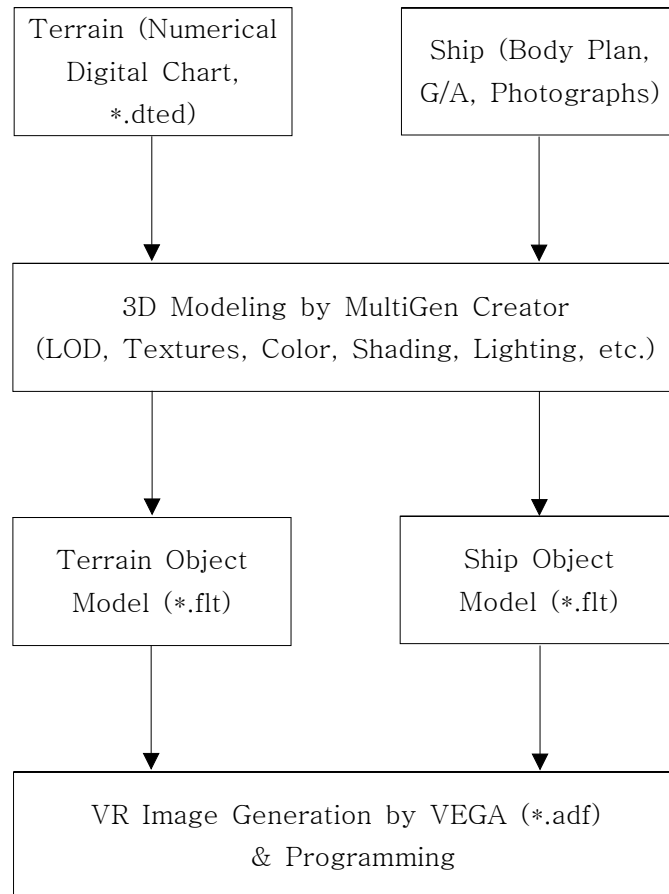


Fig. 15 Image generation procedure for terrain and ship

실시간 VR(Virtual Reality) 시뮬레이션에 있어서 여러 지형지물과 선박 등을 실시간으로 재현하기 위해서는 3차원 모델을 기하학적이고 계층적으로 묘사하는 과정이 필요하다. 이와 같은 모델을 생성할 수 있는 3차원 제작도구로서 MultiGen Creator(MultiGen-Paradigm Inc.)을 이용하여 모델을 생성하였다. MultiGen Creator는 실시간 시뮬레이션이 요구하는 모델링 시스템인 OpenFlight 데이터 포맷을 사용하며 3차원 모델링 및 특수효과 모델링을 처리하는데 있어서 매우 탁월하다 [15].

Fig. 15은 지형과 선박의 3차원 모델 생성 과정을 보이고 있다. 다음으로 실시간 VR 시뮬레이션을 위한 3차원 렌더링이 필요하다. 이때 시뮬레이션 대상 물체들의 운동상태를 실시간으로 정확히 표현해야 하면 움직이고 있는 물체에 대해 부드럽고 연속적인 영상이 요구된다. 이를 위해 3차원 렌더링 툴로서 OpenGL을 기반으로 하는 VEGA(MultiGen Paradigm Inc.)를 이용하였다[16]. VEGA는 MultiGen Creator에 의해 생성된 여러 모델을 기반으로 하여 ADF(Application Definition File) 파일이라는 VR 모델을 생성하며 Visual C++ 프로그램과 연동되어 렌더링을 하게 된다. 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.

## 5. 충돌사고 과정의 재현 실험 및 사고 원인 분석

### 5.1 공시선박의 재현

Ship A와 Ship B의 충돌사고를 컴퓨터를 이용한 가상공간, 즉, 충돌재현 시뮬레이터 상에서 재현하기 위해 양 선박의 3차원 형상 및 조종성능을 다음의 자료를 참고하여 구현하였다.

#### 5.1.1 Ship A의 재현

- ① Ship A의 주요목 자료
- ② Ship A의 일반배치도
- ③ 비슷한 선형의 조종성 시운전 자료

#### 5.2.2 Ship B의 재현

- ① Ship B(Pusher)와 Ship B(Barge)의 주요목 자료
- ② Ship B(Phsher)와 Ship B(Barge)의 일반배치도
- ③ Ship B(connected)의 조종성 시운전 자료
- ④ Ship B의 사진

Ship A와 Ship B의 주요목 자료를 Table 2에 보인다. 이 주요목 자료를 이용하여 양 선박의 유체력미계수를 추정하였다.

Table 3은 주요목 자료를 이용하여 추정한 두 선박의 유체력미계수를 나타낸다.

Fig. 16에 재현된 두 선박의 조종성능을 확인하기 위해 실시된 선회시험(Turning Test)의 결과를 나타내고 있다. 이 선회시험은 Ship A와 Ship B를 각각 10.5kt와 7.2kt의 상태로 타각 35°로 명령하였을 때 양 선박의 우선회운동(starboard turning motion)을 시뮬레이트(simulate)한 것이다. Ship A는 선박이 노후되었고 충돌 후 침몰하여서 시운전 자료를 구하지 못하였다. 따라서 비슷한 선형의 조종성 시운전 자료를 토대로 선회시험을 실시하였다. 아울러 유체력미계수를 추정함에 있어서도 자료가 부족한 것은 비슷한 선형의 자료를 토대로 구하였다. 그리고 위의 자료를 참고하여 구현한 양 선박의 3차원 형상을 Fig. 17에 보인다.

**Table 2** Principal Dimensions

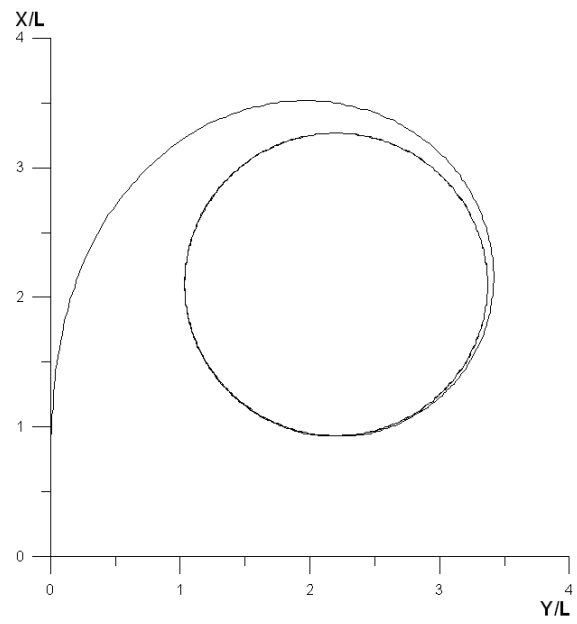
Item \ Ship			Ship B			
			Ship A	Barge	Pusher	Pusher /Barge
<b>Hull</b>						
Length over all	L <sub>OA</sub>	(m)	93.93	139.0	32.0	152.0
Length bet. per.	L	(m)	82.0	137.0	30.0	145.0
Breadth	B	(m)	14.4	19.5	13.0	19.5
Depth	D	(m)	7.10	8.85	6.52	
Draft	d	(m)	5.9	4.5 (Ballast)	4.5	4.5
Block coef.	C <sub>B</sub>		0.76	0.8	0.75	about 0.8
<b>Rudder</b>						
Area	A <sub>R</sub>	(m <sup>2</sup> )	8.849		7.26*2	
Height	H	(m)	3.59		3.3	
Aspect ratio	λ		1.456		1.5	
Area ratio	A <sub>R</sub> /Ld		1/55.6			
<b>Propeller</b>						
Diameter	D	(m)	3.3		2.6*2	
Pitch	P	(m)	2.64		2.1	
Pitch ratio	P/D		0.8		0.8	
Expanded area ratio			0.62		0.62	
Number of Blades			4		4	

\*2 means twin propellers or twin rudders

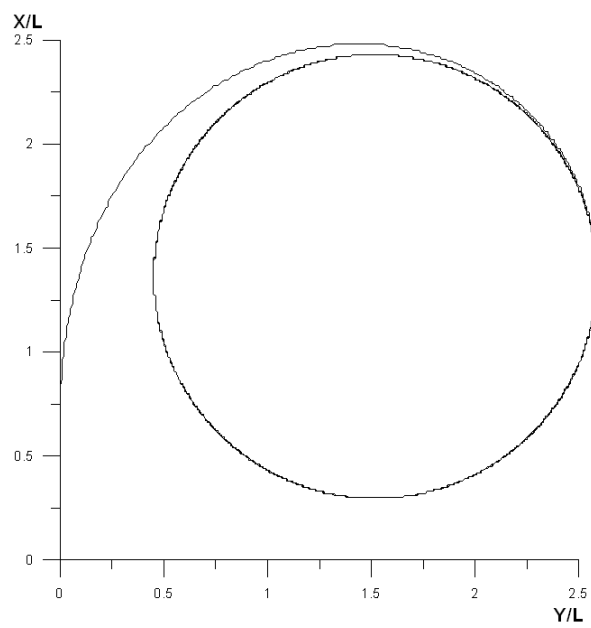
**Table 3** Hydrodynamic derivatives and other coefficients

	Ship A	Ship B
<b>Inertia</b>		
$m'$	0.26693	0.21517
$m_x'$	0.01495	0.01205
$m_y'$	0.26159	0.15062
$I_z'$	0.01537	0.01239
$k_z'$	0.24000	0.24000
$J_z'$	0.01259	0.00939
$k_{z1}'$	0.21000	0.21000
<b>Derivatives</b>		
$Y_v'$	-0.41289	-0.24812
$Y_{ur}'$	0.11302	0.04875
$N_v'$	0.00000	0.00000
$N_{uv}'$	-0.14390	-0.06207
$N_r'$	-0.05700	-0.02966
$Y_{vv}'$	-0.55868	-0.22004
$Y_{vr}'$	-0.26803	-0.36300
$Y_{urr}'$	-0.04586	-0.02153
$N_{rr}'$	-0.01614	-0.02867
$N_{vvr}'$	-0.10145	-0.06414
$N_{uvrr}'$	0.07426	0.01797
$X_{vr}'$	-0.06069	-0.02485
$X_{uu}'$	-0.01082	-0.00833
<b>Coefficient</b>		
$w_{PO}$	0.32140	0.35300
$w_{RO}$	0.28388	0.29123
$t$	0.22427	0.24533
$t_R$	0.23720	0.26800
$a_H$	0.49644	0.33385
$x_H'$	-0.45000	-0.45000
$x_P'$	-0.48000	-0.48000
$x_R'$	-0.50000	-0.50000
$l_R'$	-0.90000	-0.90000
<b>Trial</b>		
$V_0$ (kt)	11	7.0
$n_0$ (rpm)	142.49	75.56



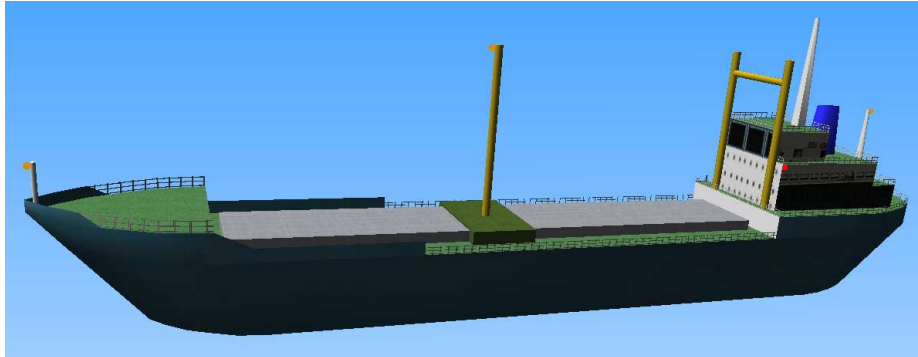


Ship A

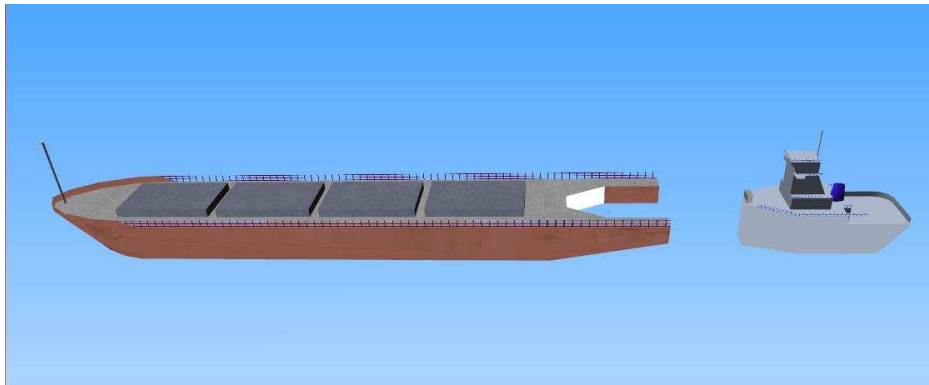


Ship B

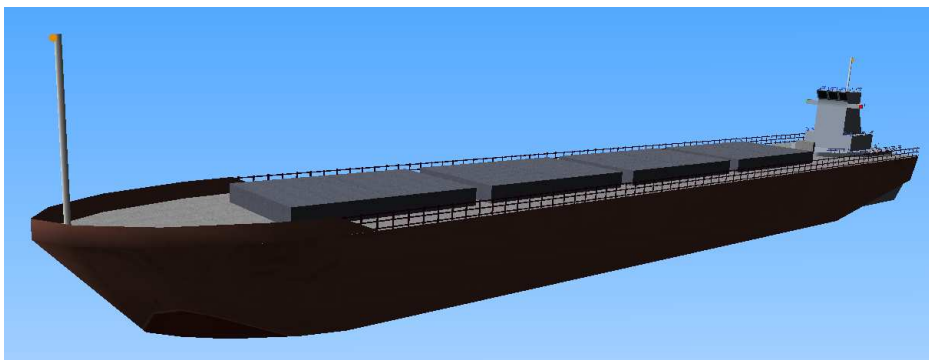
**Fig. 16** Turning Test of Ship A and Ship B



Ship A



Ship B(divided)



Ship B(connected)

**Fig. 17** 3 dimensional modeling of Ship A and Ship B

## 5.2 사고해역의 재현

포항항의 수치해도, 해도 그리고 항공사진 등의 자료를 토대로 4절에서 언급한 과정을 거쳐 사고해역 지형의 3차원 데이터베이스를 구축하였다. 데이터베이스 구축 시에 항내의 건물이나 크레인 등과 같은 세부 건축물은 모델링을 하지 않았다. 사고 발생지역이 포항항의 내항이 아니라 포항항의 외항 방파제 부근에서 발생하였으므로 편의상 데이터베이스의 구축에 세부구조물들은 포함시키지 않았다. 사고해역의 3차원 형상을 Fig. 18에 나타낸다.



**Fig. 18** 3 dimensional modeling of Pohang-harbour and surrounding area

### 5.3 충돌과정의 재현 실험

Fig. 19는 충돌사고 당시 포항지방해양수산청 항만교통정보센타의 컴퓨터자료[17]에 의한 양 선박의 항적 및 각 시각대별 위치를 나타내고 있다. 선박의 위치 표시는 매 1분 간격으로 나타내어지고 있으며, 매 시각에는 시각과 동시에 편의상 번호를 붙여서 위치를 표시하고 있다.

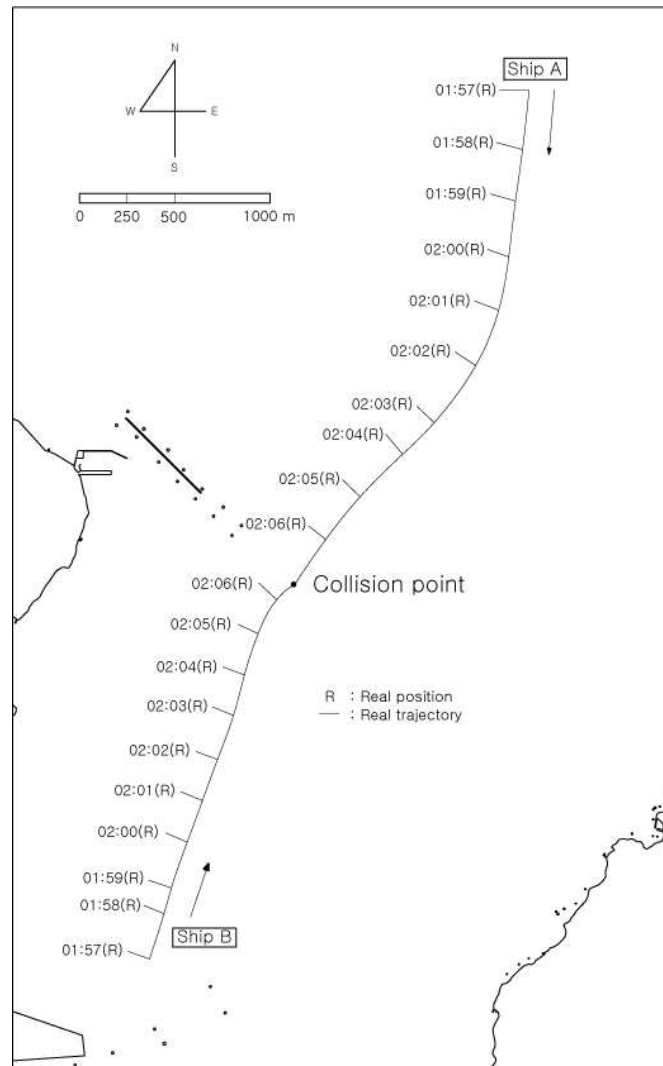
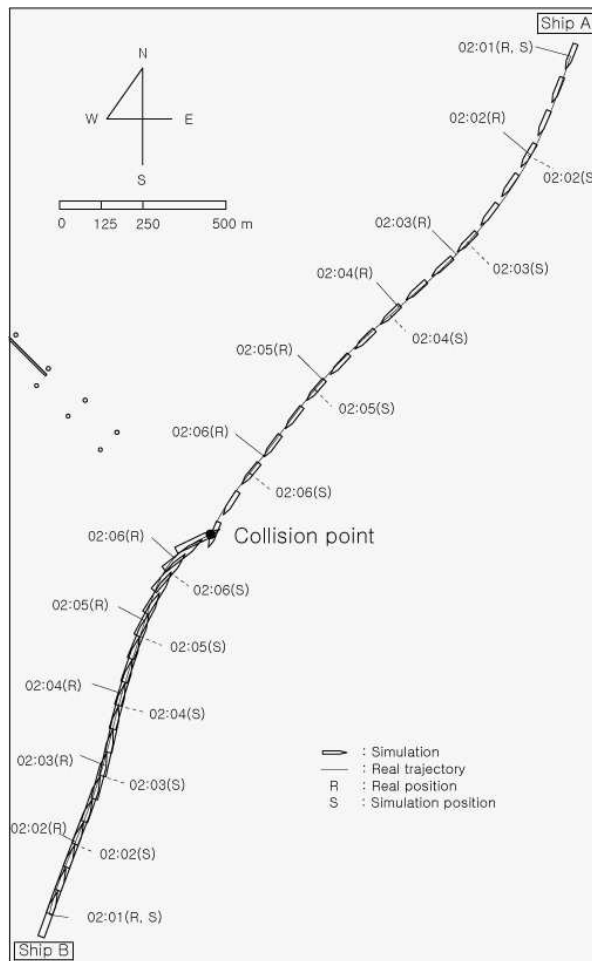
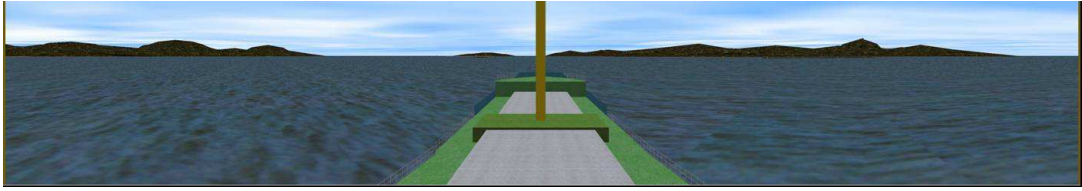


Fig. 19 Real trajectories and positions of both ships for about 10 minutes just before collision accident

Fig. 20은 충돌과정 재현 시뮬레이션 실험에 의한 양 선박의 항적 및 각 시각대별 위치를 나타내고 있다. 선박의 위치는 매 20초 간격으로 표시되고 있다. 시뮬레이션 실험은 15번 위치(02시 01분)에서 시작하였으며, 15번 위치에서의 초기선속은 Ship A가 10.5kt, Ship B는 7.2kt이며, 이후 선속 변경은 하지 않고 타각 제어만으로써 선박을 조종하였다. 그리고 바람과 조류 등 외력의 영향은 고려하지 않았다. 당시 사고해역의 시정은 약 5~6마일 정도로 양호하였는데 시뮬레이터의 화면에서 야간에 이 정도의 시정을 확보하기가 어려워 주간 상태를 상정하여 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 그리고 Fig. 21은 스크린 상에서 시뮬레이션 실험중의 장면을 캡처한 그림을 나타내고 있다.



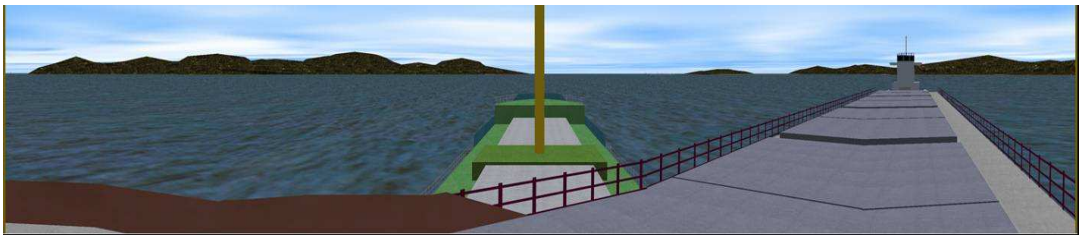
**Fig. 20** Comparison of trajectories and positions of both ships by simulator experiment on reproducing collision accident with real ones



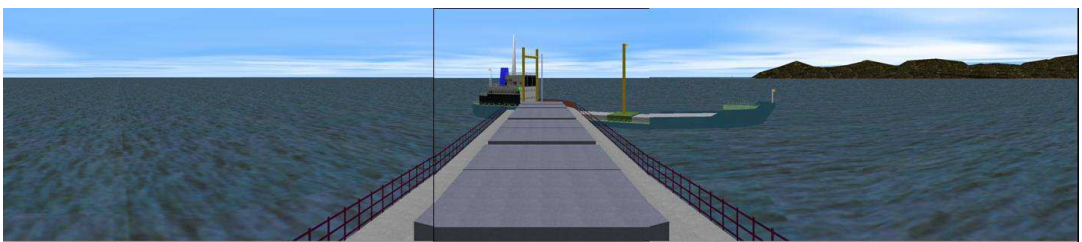
From Ship A



From Ship B



From Ship A



From Ship B

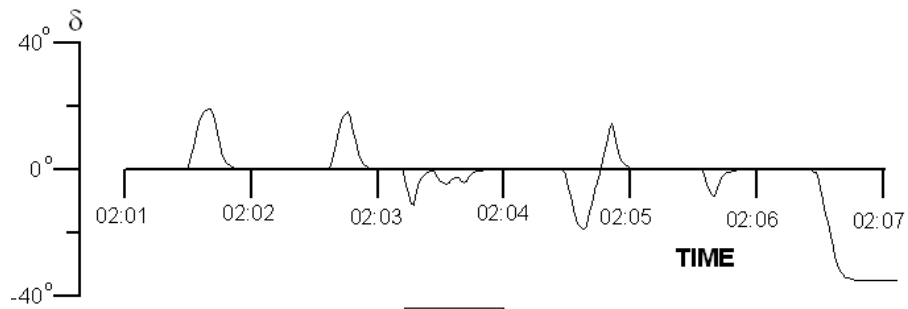
**Fig. 21** Initial and Collided view between Daehan1/2-ho and Namil-ho

시뮬레이션 실험 결과, 양 선박은 실제 항적을 잘 따라서 항행하고 있음을 알 수 있고, 또한 실제 충돌위치에서 충돌이 발생하고 있으며, 충돌시 양 선박의 충돌 자세 및 교각 등도 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 단, 각 시각대별 양 선박의 위치는 실제와 약간의 차이를 보이고 있는데, 이것은 포항지방해양수산청 항만교통정보센터의 컴퓨터 자료[17]의 위치정보에 약간의 오류가 있는 듯 하다.

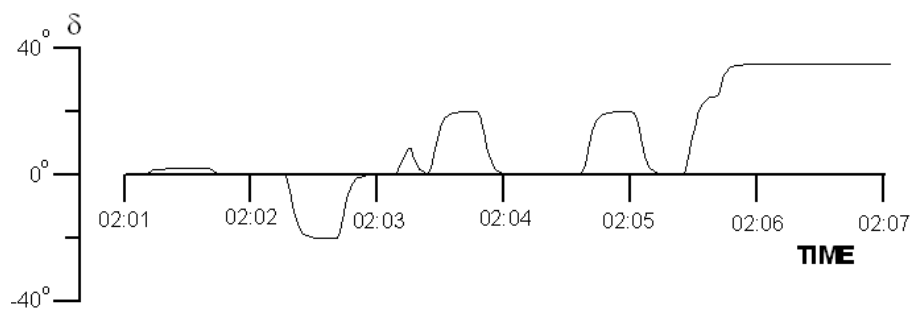
이 실험의 분석에 앞서, 항법에서는 “유지선”을 상대선을 우현측에 두고 있는 선박으로 피항선은 반대로 “상대선”을 좌현측에 두고 있는 선박으로 정의하고 있다. 그리고 양 선박이 교차시에 좌현대 좌현의 항행을 원칙으로 하고 있다.

Fig. 22은 충돌과정 재현 시뮬레이션 실험 시 타각의 변화를 나타내고 있다. Fig. 22에 의하면 Ship B는 피항동작으로서 02시 05분 30초경에 우현조타를 하였으며, 이로부터 약 1분 후인 02시 06분 30초경에 Ship A는 좌현조타를 함으로써 결국 충돌에 이르렀다고 볼 수 있다. 충돌사고 재현 시뮬레이션 실험 결과 본 충돌사고의 원인을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- Fig. 20의 02시 02분 위치 또는 02시 03분 위치에서 Ship B는 “피항선”이고 Ship A는 “유지선”의 관계에 있었는데, Ship B의 피항동작이 늦어진 것이 사고의 원인제공을 하였다고 생각된다.
- Ship B가 피항동작으로서 우현 변침을 하고 난 이후에 Ship A가 협력동작으로서 우현 변침을 하지 않고 반대로 좌현 변침을 한 것이 사고의 결정적 원인으로 생각될 수 있다.



**Ship A**



**Ship B**

**Fig. 22** Changes in rudder angles during simulator on experiment reappearing collision accident



## 5.4 가상시나리오 실험

앞에서 언급한 충돌재현 시뮬레이션 실험에 추가하여 항법 적용 시기를 달리하는 두 가지 가상시나리오를 상정하여 시뮬레이션 실험을 수행하였다.

### 5.4.1 가상시나리오1

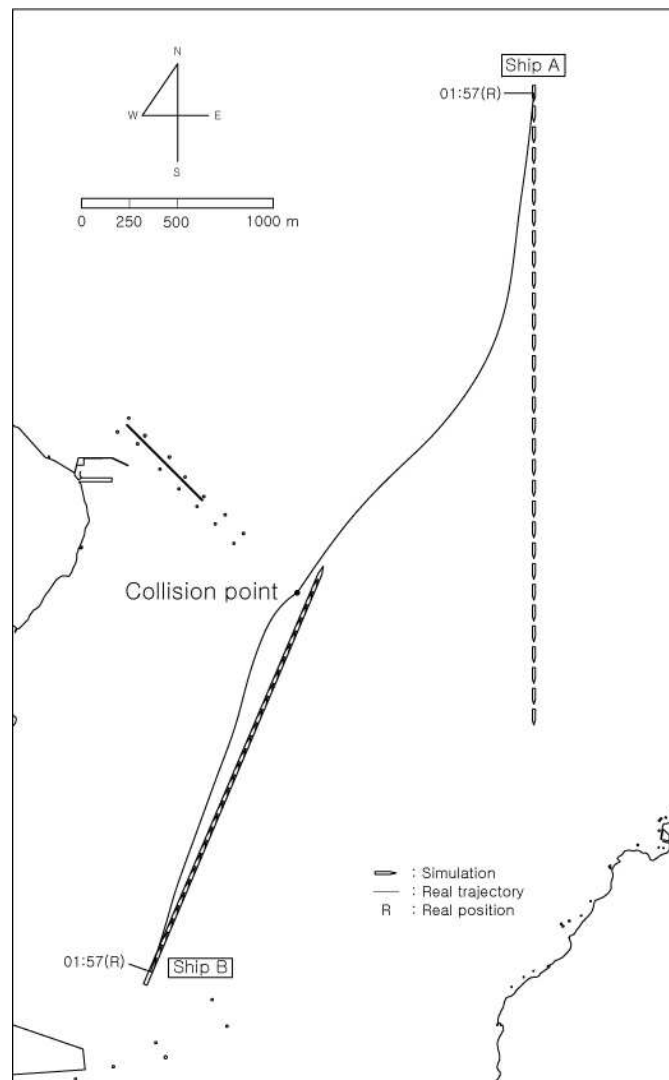


Fig. 23 Simulator experiment based on scenario (1)

첫 번째 가상 시나리오 실험으로서 항법 적용시기를 01시 57분 위치로 보았을 경우이다. 이 시점에서 Ship A와 Ship B의 상관관계는 다음과 같다[17].

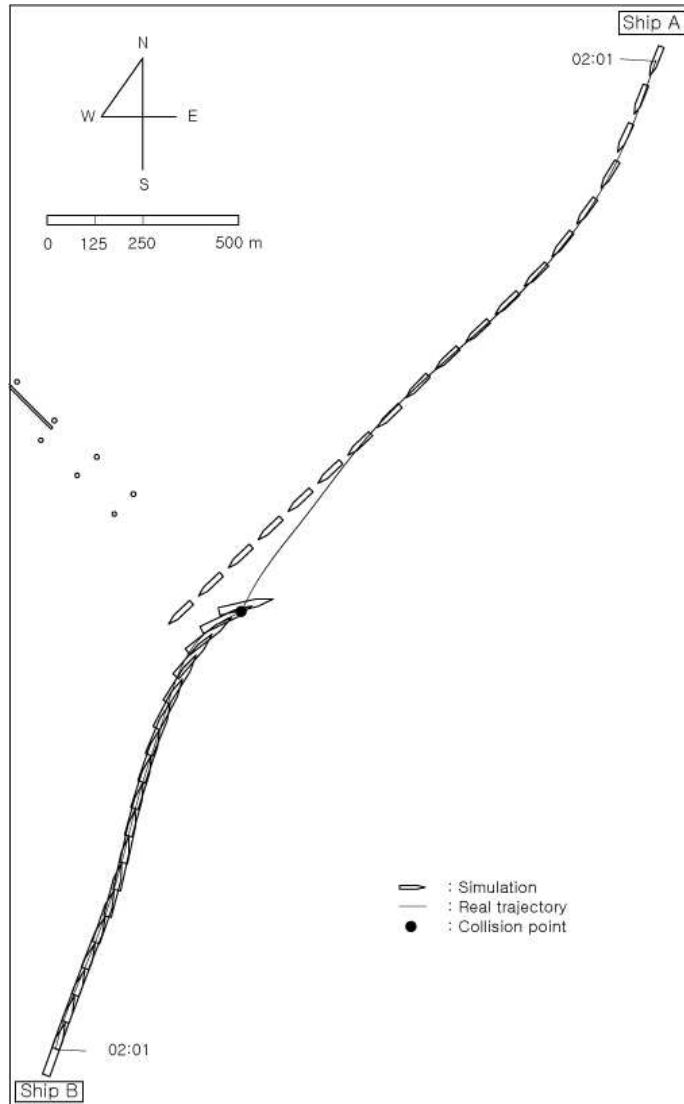
- Ship A                    침로(선수방위)    :   180°
- Ship B                    침로(선수방위)    :   023°
- 양 선박간의 교각                                    :   23°
- 양 선박간의 거리                                    :   2.64 *mile*

위 상황에서 양 선박은 횡단 상태에 해당하며, Ship A는 “피항선”, Ship B는 “유지선”의 관계에 있었다.

가상시나리오 시험은 다음과 같이 수행되었다. 01시 57분 위치에서 출발하며, 초기 선속은 Ship A는 10.5kt, Ship B는 7.2kt이며, 이후 양 선박 모두 초기침로를 그대로 유지하도록 하였다. 실험 결과를 Fig. 23에 보이고 있다. 이 시험 결과에 의하면 양 선박은 모두 안전하게 항과할 수 있었다. 따라서 Ship A가 “피항선”으로서 적절한 피항 조치를 취하였다면 충돌사고는 피할 수 있었다고 사료된다. 따라서 이 시점을 항법 적용 시기로 보았을 경우에 Ship A가 “피항선”으로서 충돌사고에 관한 책임이 있다고 판단된다.

#### 5.4.2 가상시나리오2

두 번째 가상시나리오 실험으로서 항법 적용시기를 02시 03분 위치로 취하였을 경우이다. 02시 01분 위치에서 출발하여 양 선박 모두 02시 03분까지는 실제 항적을 따라서 항행하였고 그 이후에는 Ship B는 가능한 한 실제 항적을 따르도록 조종하였으며 Ship A는 02시 03분 위치에서의 침로를 그대로 유지하도록 선박을 조종하였다. 이것을 제외한 모든 환경조건 및 선속은 실험 1과 동일하게 수행하였다. 가상시나리오 실험 결과를 Fig. 24에 나타냈다. 02시 03분 위치에서 양 선박의 관계는 Ship B는 “피항선”, Ship A는 “유지선”의 관계에 있었다. 이 실험 결과로부터 Ship A가 “유지선”으로서 자신의 침로를 그대로 유지했었다면 충돌사고를 피할 수 있었을 것으로 사료된다. 그리고 이때 양 선박간의 최근접점거리(DCPA : Distance of Closest Point of Approach)는 약 100m로 측정되며, 이 정도의 이격거리로 항과할 경우 양 선박은 서로 항행할 수 있었을 것으로 판단된다. 따라서 이 시점을 항법적용시기로 보았을 경우의 사고의 책임은 Ship A에게 있다고 사료된다.



**Fig. 24** Simulator experiment based on scenario (2)

## 5.5 실험 결과

이상의 연구들 통해서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에 활용한 충돌재현 시뮬레이터는 두 선박간의 충돌사고 재현 및 사고 원인 분석에 유용함을 알 수 있었다.

2. Ship A와 Ship B의 충돌사고에 관한 시뮬레이션 실험 결과, 양 선박의 항법 적용 시기를 양 선박의 초인 시점으로 취하면, Fig. 23의 01시 57분 위치에서 Ship B는 “유지선”, Ship A는 “피항선”의 관계가 되며, 그 이후의 모든 책임은 일차적으로 “피항선”인 Ship A 측에 과실이 있다고 간주된다.

3. Ship A와 Ship B의 충돌사고에 관한 시뮬레이션 시험 결과, 양선박의 항법 적용 시기를 양 선박간 거리가 약 1.35마일로 관측되는 시점 즉, 02시 03분경으로 취할 때 사고 원인은 다음과 같이 분석된다.

- 첫째, Ship B의 피항동작이 늦어진 것이 사고 원인 제공을 하였으며
- 둘째, Ship B가 피항동작으로서 우현 변침을 하고 난 후 Ship A가 협력 동작으로서 우현 변침을 하지 않고 반대로 좌현 변침을 한 것이 사고의 결정적 원인으로 생각될 수 있다.
- 셋째, Ship A가 “유지선”으로서 침로를 그대로 유지하였다면 충돌사고는 피할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 선박간의 충돌을 재현할 수 있는 충돌재현 시뮬레이터의 구축에 관하여 논하였다. 또한 조종운동의 수학적모델에 대해서도 논하였으며 기본적인 조종성능을 확인하였다. 이렇게 구축된 충돌재현 시뮬레이터를 통하여 실제의 충돌사고 재현 실험을 수행하였으며, 이 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 구축된 충돌재현 시뮬레이터는 충돌재현 뿐만 아니라 충돌사고의 원인 분석에 유용함을 확인 할 수 있었다.
- (2) 구축된 시뮬레이터를 사용하여 충돌사고와 관련된 여러 가지 물리적인 요인들을 함께 분석할 수 있었다.
- (3) 이 연구를 통해서 2002년 8월 22일 포항항 인근에서의 Ship A와 Ship B 사이에 실제로 발생한 충돌사고의 재현과 보다 효과적인 사고 원인 분석을 수행할 수 있었다.

앞으로 본 충돌재현 시뮬레이터를 통하여 신조선 설계시 조종성능 평가 및 항만 설계시 안정성 평가 등과 같은 여러 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것이라 사료된다. 아울러 보다 실세계에 가까운 영상과 Full Mission 시뮬레이터로의 발전을 위해 레이더(Radar)와 전자해도(Electronic Chart Display Information System)의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] Sohn, Kyoung-Ho, "Ship Motion & Manoeuvrability", Textbook, Division of Marine Systems Engineering of Korea Maritime University, 2000.
- [2] Newman, J. N., "Marine Hydronamics", page 135~144, The MIT Press, Cambridge, 1978.
- [3] Ogawa, A., et al., "MMG Report I", Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, No. 575, 1977.
- [4] 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.
- [5] Inoue, S., et al., "Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring", ISP, Vol. 28, No. 320, 1981.
- [6] 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.
- [7] 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, 1985.
- [8] van Lammeren, W. P. A. et al., "The Wageningen B-Screw Series", Transaction of SNAME, Vol. 77, 1969.
- [9] Fujino, Masataka, et al., "On the Manoeuvrability of Ships while Stopping by Adverse Rotation of Propeller (1st Report)", Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 168, pp. 57-70, 1978.
- [10] Fujii, J., "Experimental Research on Rudder Performance(1st Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 107, 1960.

- [11] 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.
- [12] Isherwood, R. M., “Wind Resistance of Merchant Ship” , Transaction of RINA, Vol. 114, 1972.
- [13] 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.
- [14] Arick, Martin R., “The TCP/IP Companion :A Guide for the Common User” , QED Publishing Group, Boston, 1993.
- [15] “MultiGen Creator User’s Guide” , MultiGen Paradigm Inc., 1997.
- [16] “Vega Programmer’s Guide Version 3.5”, MultiGen Paradigm Inc., 2000.
- [17] Port Traffic Management Service Center., Printed Material of Computer Image Data on Trajectories of Ship A and Ship B, Pohang., 2002.