

工學碩士 學位論文

IMO 선박 조종성 기준의 변침 및 보침성능 검증에 관한 시뮬레이터 연구

A Simulator Study on Validation of IMO's Ship
Manoeuvrability Standards with Particular Reference to
Yaw-Checking and Course-Keeping Ability

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 梁勝烈

本 論文을 梁勝烈의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長：工學博士 朴 錫 柱 (印)

委 員：工學博士 朴 珠 用 (印)

委 員：工學博士 孫 景 浩 (印)

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科 梁 勝 烈

목 차

Abstract	II
Nomenclature	III
List of Figure	V
List of Table	VI
1. 서 언	1
2. IMO 조종성 기준	2
3. 시뮬레이션 수학모델과 변침 및 보침 성능	5
3.1 수학모델	5
3.2 침로안정 판별식	7
3.3 변침 및 보침 성능	11
4. 선박과 조종성의 채택	12
4.1 선박의 채택	12
4.2 조종성능의 변화	17
5. 시뮬레이션 실험	26
5.1 시뮬레이션 모델링	26
5.2 시뮬레이션 실험 및 고찰	32
6. 결 언	44
참고문헌	45

Abstract

Recent marine disaster of large ships often causes serious oil pollution. To prevent or reduce such a disaster, International Maritime Organization(IMO) has been endeavoring to increase ships manoeuvrability, and adopted the interim standards for ship manoeuvrability A751(18) in 1993. These standards cover the typical manoeuvrability including turning ability, initial turning ability, yaw-checking and course-keeping ability, and stopping ability. Yaw-checking and course-keeping ability in IMO's ship manoeuvrability standards is reviewed from the viewpoint of safe operation.

In this paper the authors review the manoeuvrability standards particularly focussing the criterion for the yaw-checking and course-keeping ability. Three types of actual-ship (the authors take three types of original actual-ship built in Korea recently) are taken as tested model. Assumed series-ships which have different instability on course systematically, are generated from the actual-ships. The numerical simulation on Z-test is carried out in order to examine the correlation between known manoeuvrability and various kinds of overshoot angle. Next, using the assumed series-ships, simulator experiments are executed in situation of curved, narrow waterway by five pilots in order to examine the correlation between known manoeuvrability and subjective rating scale evaluated by pilots. Three kinds of IMO's criterion concerning yaw-checking and course-keeping ability are discussed in view of degree of manoeuvring difficulty.

Nomenclature

D	Stability discriminant term
I_{zz}	Moment of inertia about the z axis
J_{zz}	Added mass of inertia about the z axis
K'	Turning ability indication
m	Mass of ship
m_x	Added mass in the x direction
m_y	Added mass in the y direction
N_H	Yaw moment acting on a hull
N_P	Yaw moment acting on a hull induced by propeller
N_R	Yaw moment acting on a hull induced by rudder
N_T	Yaw moment acting on a hull induced by tugboat
N_W	Yaw moment acting on a hull induced by wind
r	Angular velocity
T_1'	Quick response & stability indication
T_2'	Quick response & stability indication
T_3'	Quick response indication
u^*	Longitudinal component of apparent Current velocity apparent velocity
v	Lateral velocity
V_c	velocity of current

x_G	Distance from midship to center of gravity
X_P	Longitudinal force acting on a hull induced by a propeller
X_H	Longitudinal force acting on a hull
X_R	Longitudinal force acting on a hull induced by a rudder
X_T	Longitudinal force acting on a hull induced by a tugboat
X_W	Longitudinal force acting on a hull induced by a wind
Y_H	Lateral force acting on a hull
Y_P	Lateral force acting on a hull induced by propeller
Y_R	Lateral force acting on a hull induced by rudder
Y_T	Lateral force acting on a hull induced by tugboat
Y_W	Lateral force acting on a hull induced by wind

Greek symbols

α	x coordinate of center of m_y
δ	Rudder angle
ψ_c	Relative angle of current
ψ	Heading angle
\cdot	Time derivative
$'$	Non dimensional sign

List of Figures

Fig. 1	Turing circle	2
Fig. 2	Example of Z-test	3
Fig. 3	Coordinate system for describing ship manoeuvring motion	5
Fig. 4	Difference in characteristic of ship motion between stability and Instability	8
Fig. 5	Steady turing performance for instability ship	10
Fig. 6	Example 10deg Z-test for different spiral loop widths	11
Fig. 7	Turning test	14
Fig. 8	Spiral test	15
Fig. 9	10 deg Z-test	16
Fig. 10	Process of manoeuvrability prediction of assumed series-ships	17
Fig. 11	The effect of stern flame shape on hydrodynamic derivatives	18
Fig. 12	Rudder area ratio and stability index for generation of assumed series-ships with different spiral loop widths	19
Fig. 13	Spiral curve of assumed series-ships with different instability on course	20 ~ 22
Fig. 14	Relation between spiral loop width and 1st overshoot angle of 10 deg Z-test	23
Fig. 15	Relation between the 1st and 2nd overshoot angle of 10 deg Z-test ..	24
Fig. 16	Relation between the 1st overshoot angle of 10 deg Z-test and the 1st overshoot angle of 20 deg Z-test	25
Fig. 17	System composition of the present simulator	26
Fig. 18	Waterway employed for simulator study	27
Fig. 19	Captured 3D view seen from bridge of training ship	28
Fig. 20	Captured 3D view seen from bridge of container ship	29
Fig. 21	Captured 3D view seen from bridge of bulk carrier	30
Fig. 22	Actual front-view seen from bridge mock-up of present simulator ...	31
Fig. 23	Trajectories of assumed series-ship during the simulations ...	33 ~ 35
Fig. 24	Averaged root-mean-square values of lateral deviations	36
Fig. 25	Averaged root-mean-square values of rudder angles	37
Fig. 26	Averaged subjective evaluation rating scales by pilots	39
Fig. 27	Correlation between averaged subjective evaluation rating scales and averaged root-mean-square values of rudder angles	40
Fig. 28	Averaged subjective evaluation rating scale marked on IMO's standard diagram	41 ~ 43

List of Table

Table 1	IMO's Interim Standards for Ship Manoeuvrability	4
Table 2	Principal Dimensions	13

1. 서 언

최근 선박이 대형화, 전용화, 고속화되는 경향을 보이는 가운데 대형 선박들의 해상 충돌방지와 충돌로 인한 해양환경오염의 방지가 중요시되고 있다. 이러한 이유로 IMO(International Maritime Organization)에서는 선박의 조종성에 관한 잠정기준(Interim Standards for Ship Manoeuvrability)을 1993년 IMO Res.A.751(18)로 채택하였고 이 잠정기준을 5년 간 상용하여 자료가 축적되면 이를 근거로 해서 기준의 개정에 대해 논의하기로 하였다[1]. 이 잠정기준에는 선회성능(Turning ability), 초기선회성능(Initial turning ability), 변침 및 보침성능(Yaw-checking and Course-keeping ability), 정지성능(Stopping ability)이 포함되어 있다.

IMO 조종성 잠정기준에서 요구되는 이 4가지 항목 중 선박의 안전운항에 크게 영향을 미치며, 조선(造船)시 기준미달로 인해 문제시될 가능성이 높은 것으로서 변침 및 보침성능을 들 수 있다. IMO 조종성 기준에서는 Z-test의 Overshoot angle의 크기로써 변침 및 보침성능의 정량적 평가를 하도록 되어있지만, 이 정량적 평가는 과학적 타당성, 적합성 검증이 미비한 실정이다. 이런 실정에서도 불구하고 구미선진국들은 조종성 기준의 조기 발효를 서두르고 있으며, 2002년에는 확정을 목표로 움직이고 있다.

이런 변침 및 보침성능에 대한 검증은 실선실험을 통해서 이루어져야 하겠으나 여러 가지의 제약으로 컴퓨터그래픽 기법을 이용해 가상세계를 구축한 선박조종시뮬레이터(Ship Handling Simulator)를 활용하는 것이 효과적이라고 할 수 있다. 또한 실선을 각각 조종성 파라미터를 계통적으로 변화를 시킴으로써 조종성이 좋지 않은 가상선박들을 이용해 시뮬레이션을 할 수 있다는 이점도 있다.

본 논문에서는 IMO 조종성 잠정기준에서 변침 및 보침성능에 대해 초점을 맞추었다. 먼저 우리나라에서 건조된 세 가지 형태의 실제선박(실습선(한나라), 컨테이너선, 벌크캐리어)을 채택하여 수치시뮬레이션을 통해 구조적으로 스파이럴루프폭(Spiral Loop Width)를 변화시켜 조종성을 바꾼 뒤에 운항하기 어려운 협수로의 지형 데이터 베이스를 구축하고, 이 가상의 공간에서 우리나라 도선사들에게 조종하게 하였다. 이것은 IMO 조종성 기준에 대한 데이터의 수집과 현 IMO 조종성기준의 적합성 여부를 확인하기 위해 수행된 과정이다. 이것으로써 IMO 조종성 기준이 조종의 곤란정도의 관점에서 논의되어야 한다는 것을 본 논문에서 보인다.

2. IMO 조종성 기준

선박의 조종성은 선회를 동반하고 있기 때문에 조타를 하였을 때 선박이 회두하여 변침이 쉬운지를 평가 할 수 있는 선회성능, 선박이 침로를 잘 유지하는지에 대한 침로안전성등이 선박의 조종성 기준에 포함되어야 할 것이다.

이러한 IMO 조종성 기준은 선박의 조종성을 증진시키고 기준에 따르지 않는 선박의 건조를 방지하여 해상충돌을 방지하고 해양환경보존에 기여함을 목적으로 하고 있다.

IMO 조종성 기준을 만족하는지에 대해서는 선회시험, Z-test와 최단정지시험 등을 거쳐야만 한다. 먼저, 선회시험시에 나오게 되는 선회궤적(Turing circle)은 전타 선회시에 선체의 무게중심(G)가 그리는 궤적으로 선회 모멘트와 저항 모멘트가 같게 되면 선체는 일정한 원을 그리며 정상선회에 들어가게 된다. Fig. 1은 선회궤적을 나타내고 있다. 이와 같은 궤적으로써 선회성능을 알 수 있으며, 선회종거(Advance)는 추종성이 양호한 선박은 작고, 불량한 선박은 크다. 즉 타각을 주자마자 선회하는 선박은 선회종거가 작게 된다. 또한 선체길이가 긴 선박, 관성능률이 큰 선박, 선회반경(Transfer)이 큰 선박은 선회종거도 크다. 그리고, VLCC와 같은 초대형선 등은 추종성이 불량하여 선회종거는 큰 반면 선회성이 좋아서 선회반경은 적다.

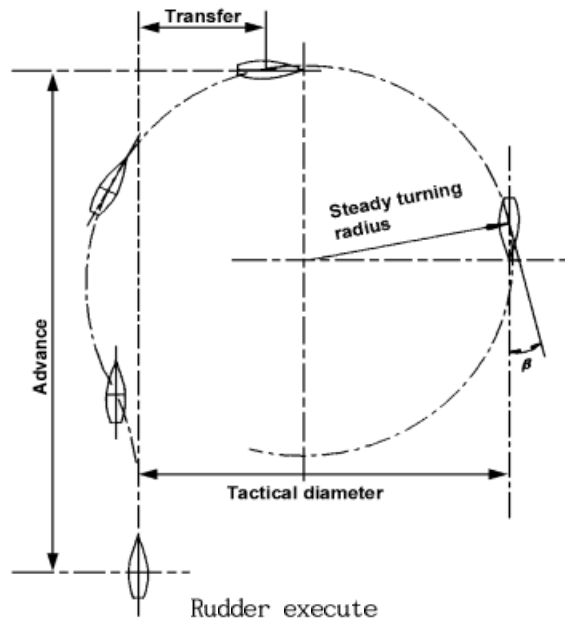


Fig. 1 Turing circle

다음으로 Z-test는 소정의 침로에서 우타각 10deg를 취한 후 선회를 하여 회두각이 우현 10deg가 되었을 때 다시 좌타각 10deg를 취해서 하는 시험이다. 20deg Z-test도 마찬가지로 방법으로 행하여진다. 이와 같은 Z-test로 선박이 얼마나 정해진 목표 침로에 도달했는지에 대해 알 수 있다. Fig. 2는 Z-test의 결과에 대한 예를 나타내고 있다.

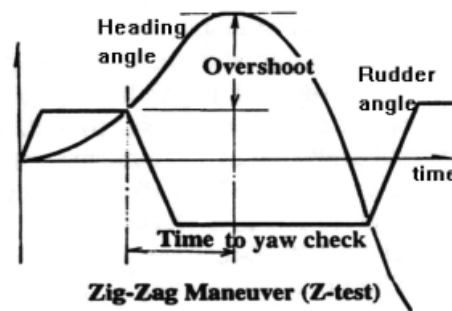


Fig. 2 Example of Z-test

마지막으로 최단정지거리시험이란 최대전진도로 전진항해 중에 최대후진속도로 명령을 내려서 선체가 완전히 정지할 때까지의 진출거리이다.

이런 기준의 적합성 여부의 확인은 설계단계에서 모형선실험 또는 수학모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션의 기준에 적합한 경우이거나 실선시험의 결과를 토대로 하여 확인할 수 있다.

이와 같은 시험으로 구성되어 있는 IMO조종성 잠정기준은 Table 1에서와 같다. Table1과 같이 현재 잠정기준에서 가장 문제가 제기되고 있는 부분은 Stopping ability와 Yaw-checking ability and Course-keeping ability이다. 일본에서 주장한 잠정기준의 제안 내용은 다음과 같다.

- ① Yaw-checking and Course-keeping ability에서 10deg Z-test의 First overshoot angle은 많은 시운전 결과와 연구결과를 토대로 결정되어있지만 10deg Z-test의 second overshoot angle 및 20deg Z-test의 First overshoot angle은 충분히 조사되지 않은 상태에서 기준으로 포함되었고, 10deg Z-test의 First overshoot angle을 만족하는 선박도 second overshoot angle 및 20deg Z-test의 First overshoot angle을 만족하지 못하고 있다
- ② 최단정지성능에 대한 기준은 대형선박들이 기준을 만족하기 힘들며, 또 실제 항해

중 최대전진속도에서 최대 후진속도로 변경하는 것은 불가능하다

- ③ 양호한 조종성능을 가지고 있는 선박도 잠정기준을 만족하지 않을 수 있으며, 현행 잠정기준을 과학적인 검증도 되지 않은 상태에서 적용하는 것은 무리가 있으며 불합리하다.

본 논문에서는 위와 같이 문제가 제기 되고 있는 부분 중에 변침 및 보침성능 기준의 적합성에 대해 초점을 맞추고 있다.

ABILITY	TEST	CRITERIA
Turning ability	Turning test with max. rudder angle	Advance < 4.5L Tact. Dia. < 5.0L
Initial turning ability	10 deg Z-test	Distance ship run before 2nd rudder execution < 2.5L
Stopping ability	Stopping test with full astern	Track reach < 15L
Yaw-checking ability and Course-keeping ability	10 deg Z-test	<ul style="list-style-type: none"> · First overshoot angle 10 deg, if L/V is less than 10sec 20 deg, if L/V is 30 sec. or more. (5+1/2(L/V)) degrees, if L/V is 10sec. or more but less than 30sec. · Second overshoot angle values for the first overshoot angle by more than 15deg
	20 deg Z-test	First overshoot angle < 25

Table 1 IMO's Interim Standards for Ship Manoeuvrability

3. 시뮬레이션 수학모델과 변침 및 보침 성능

3.1 수학모델

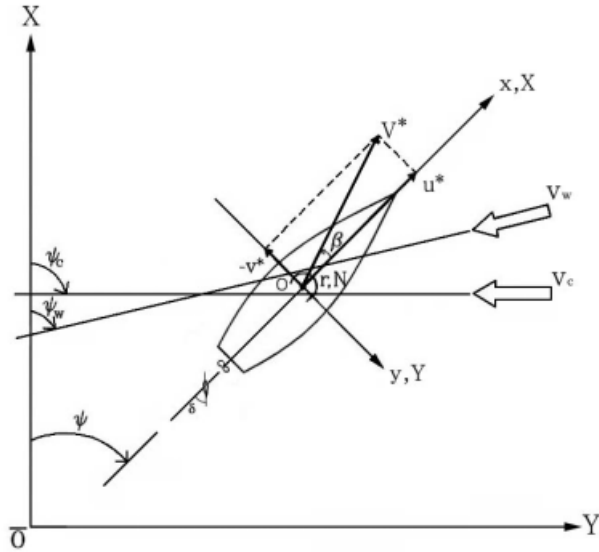


Fig. 3 Coordinate system for describing ship manoeuvring motion

수학모델에서 좌표계를 Fig. 3과 같이 설정하고 기본 조종운동방정식으로부터 Modular type model, 부가질량력, 조류에 기인하는 유체력을 적용하면 다음과 같은 최종적인 조종운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) \dot{u}^* &= (m + m_y) vr + (m x_G + m_y \alpha) r^2 \\
 &\quad - (m + m_x) V_c r \sin(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + X_H + X_P + X_R + X_T + X_W \\
 (m + m_y) \dot{v}^* + (m x_G + m_y \alpha) \dot{r} &= - (m + m_x) ur \\
 &\quad + (m + m_y) V_c r \cos(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_W
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
(I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} + (mx_G + m_y \alpha) \dot{v}^* = & - mx_G ur \\
& + (mx_G + m_y \alpha) V_c r \cos(\phi_c - \phi) \\
& + N_H + N_P + N_R + N_T + N_W
\end{aligned}$$

여기에서 첨자 H, P, R, T, W는 각각 주선체, 프로펠러, 타, 예선 및 바람에 기인하는 유체력 및 외력의 성분이다. 그리고 m 은 선체질량, m_x, m_y 은 각각 x 축 방향, y 축방향 부가질량, I_{zz} 는 z 축 주위의 관성모멘트, J_{zz} 는 z 축 주위의 부가관성모멘트, u, v, r 은 각각 선체중양에서의 x 축 방향, y 축 방향, z 축 방향 속도성분, $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 은 u, v, r 의 시간에 대한 도함수, x_G 는 선체 무게중심의 x 좌표, α 는 m_y 중심의 x 좌표, $u^*, v^*, \dot{u}^*, \dot{v}^*$ 는 대지속도와 가속도를 나타낸다.

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

본 논문에서는 이용되어진 수학모델에서 나타나는 유체력미계수와 많은 다른 계수들은 Shon, Inoue, van Lammeren 등의 논문을 참조하여 구하였다[2][3][4].

3.2 침로안정 판별식

침로안정 판별식은 선박의 침로 안정성의 여부를 확인할 수 있는 식이다. 선박이 처음 건조 될 때에 각각의 유체력미계수는 정하여 지며, 이 유체력미계수로부터 선박의 침로안정성을 판별할 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 판별식을 이용하여 침로안정성을 판별하였으며 수치적인 계산에 의해 선박의 침로안정을 구분 하였다. 다음에서 침로안정의 판별방법을 보인다[5].

Nomoto 응답모델로부터 나온 식

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K' \delta + K' T_3' \dot{\delta}' \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} T_1' T_2' &= \frac{-(m' + m_v')(I_{zz}' + J_{zz}')}{Y_{\beta}' N_r' - N_{\beta}'(Y_r' - m')} \\ T_1' + T_2' &= \frac{N_r'(m' + m_v') - Y_{\beta}'(I_{zz}' + J_{zz}')}{Y_{\beta}' N_r' - N_{\beta}'(Y_r' - m')} \\ K' &= \frac{Y_{\delta}' N_{\beta}' - N_{\delta}' Y_{\beta}'}{Y_{\beta}' N_r' - N_{\beta}'(Y_r' - m')} \\ T_3' &= \frac{-(m' + m_v') N_{\delta}'}{Y_{\delta}' N_{\beta}' - N_{\delta}' Y_{\beta}'} \end{aligned}$$

(2)식을 선박이 타각(δ) 0° 인 상태에서 항행하고 있을 때 $r'(t)$ 의 해를 구하기 위해서 우변을 0 이라 두면

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = 0 \quad (3)$$

상기 2계 선형 미분방정식의 보조방정식의 근이 $-1/T_1'$, $-1/T_2'$ 이므로

$$r'(t) = C_1 e^{-t/T_1'} + C_2 e^{-t/T_2'} \quad (4)$$

여기서 C_1 , C_2 는 초기조건에 의해 결정되는 상수이다.

(4)식에서 T_1' , T_2' 가 전부 양(+)이면 $r'(t)$ 는 0에 수렴한다. 그러나 T_1' , T_2'

어느 한 값이라도 음(-)이면 $r'(t)$ 는 발산한다. 즉, 선박이 타각 0° 인 상태에서 항

행하고 있을 때 아주 미소한 외란(外亂)이라도 작용하면 선체가 회두운동을 일으키는데, 외란이 제거되고난 이후에 회두각속도가 0에 수렴하는 경우가 침로안정한 선박이고, 회두각속도가 점점 발달하는 경우가 침로불안정한 선박이다.

한편, (2)식에서 추종 및 안정성지수 T_1' , T_2' 는

$$T_1' T_2' = \frac{-(m' + m_y')(I_{zz}' + J_{zz}')}{Y_\beta' N_r' - N_\beta'(Y_r' - m')}$$

$$T_1' + T_2' = \frac{N_r'(m' + m_y') - Y_\beta'(I_{zz}' + J_{zz}')}{Y_\beta' N_r' - N_\beta'(Y_r' - m')}$$

와 같이 주어졌는데, 일반적으로 보통 선박의 경우 $Y_\beta' > 0$, $N_\beta' > 0$, $N_r' < 0$ 이므로 상기 $T_1' T_2'$ 와 $(T_1' + T_2')$ 의 분자는 음(-)이다. 따라서 이들의 분모가 음(-)이면 T_1' , T_2' 가 양(+) 즉, 침로안정하게 된다. 그리고 식으로부터 T_1' , T_2' 의 값이 작을수록 침로안정성이 좋다고 말할 수 있다.

따라서, 안정의 조건은

$$D = Y_\beta' N_r' - N_\beta'(Y_r' - m') < 0$$

여기서 D 를 안정판별항(stability discriminant term)이라 정의한다. 침로안정한 선박과 침로불안정한 선박의 운동특성을 나타내면 Fig. 4와 같다.

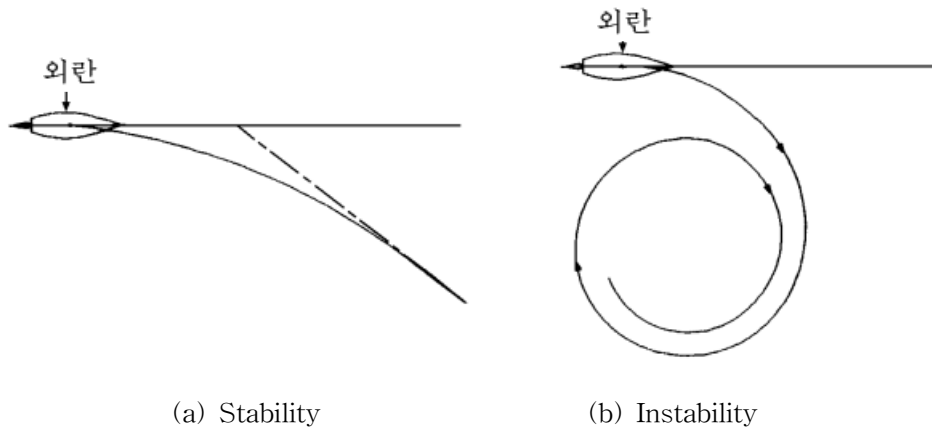


Fig. 4 Difference in characteristic of ship motion between stability and Instability

앞에서의 침로 안정판별식은 다음과 같이 표현할 수도 있다.

$$D = Y_{\beta}'(Y_r' - m') \left[\frac{N_r'}{Y_r' - m'} - \frac{N_{\beta}'}{Y_{\beta}'} \right] < 0$$

일반적으로 보통의 선박인 경우 $Y_{\beta}'(Y_r' - m') < 0$ 이므로 안정의 조건은

$$\frac{N_r'}{Y_r' - m'} > \frac{N_{\beta}'}{Y_{\beta}'}$$

와 같이 나타낼 수도 있다.

다음으로 정상선회(steady turning) 특성을 나타내는 $r' - \delta$ 곡선으로부터 침로안정성(stability on course)의 판별 방법을 고찰해 본다.

정상선회시 식(2)의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r'(t') = C_1 e^{-t'/T_1'} + C_2 e^{-t'/T_2'} + K' \delta_0 \quad (5)$$

여기서 K' : 선회력(turning ability)지수

T_1', T_2' : 추종 및 안정성(responsiveness & stability)지수

$$(T_1' > T_2')$$

T_3' : 추종성지수, C_1, C_2 : 상수

식(5)에서 T_1' 와 T_2' 가 양(+)일 때(즉, 침로안정한 선박)를 가정하면, T_1' 와 T_2' 의 값이 작을수록 회두각속도 r' 가 $K'\delta_0$ 에 빨리 도달됨을 알 수 있다. 이것을 추종성이라 한다. 한편, T_3' 의 영향은 식(5) 우변의 상수 C_1, C_2 에서 나타나는데, T_1' 와 T_2' 값이 일정한 상태에서는 T_3' 값이 클수록 r' 가 $K'\delta_0$ 에 빨리 도달하는 데 기여한다. 이것은 조종운동의 응답모델을 나타내는 식(1) 우변의 $K'T_3'\delta'$ 항이, 변침시 회두운동을 촉진시키는 작용을 하기 때문이다. 따라서 T_3' 는 추종성과 관련된다. 그리고 K' 값이 클수록 동일 타각에서의 정상 회두각속도가 커지므로 선회력이 좋다는 것을 알 수 있다.

식 (5)에서 시간 t를 무한히 길게 하면 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r'(\infty) = K' \delta_0 \quad (6)$$

여기서 $K' = \frac{Y_\delta' N_\beta' - N_\delta' Y_\beta'}{D}$ (단, D : 안정판별항)

식(6)으로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① $D < 0$ 즉, 침로안정한 경우, $Y_\delta' < 0, N_\delta' > 0, Y_\beta' > 0, N_\beta' > 0$ 이므로 $K' > 0$ 이다.
- ② $D > 0$ 즉, 침로불안정한 경우, $K' < 0$ 이다.
- ③ $D = 0$ 즉, 한계안정(marginally stable)의 경우, $K' = \infty$ 이다.
- ④ $D < 0$ 이고 D 의 절대값이 클수록 즉, 침로안정성이 좋을수록, K' 가 작아지므로 선회성이 나빠진다.
- ⑤ 미소 타각 즉, $\delta_0 \approx 0$ 일 때 $K' = r'(\infty)/\delta_0$ 이므로, $r' - \delta$ 곡선의 원점에서의 기울기가 K' 이다.

이상의 고찰로부터 침로불안정한 선박의 정상선회특성을 도시(圖示)하면 Fig. 5와 같다. 침로불안정한 선박은 K' 가 음(-)이므로 $r' - \delta$ 곡선에서 히스테리시스루프(Hysteresis loop)를 형성한다. 이와 같은 곡선은 Spiral test에서 얻어 질수 있으며 Spiral 곡선이라고 한다. Fig. 5는 Spiral 곡선을 나타내고 있다.

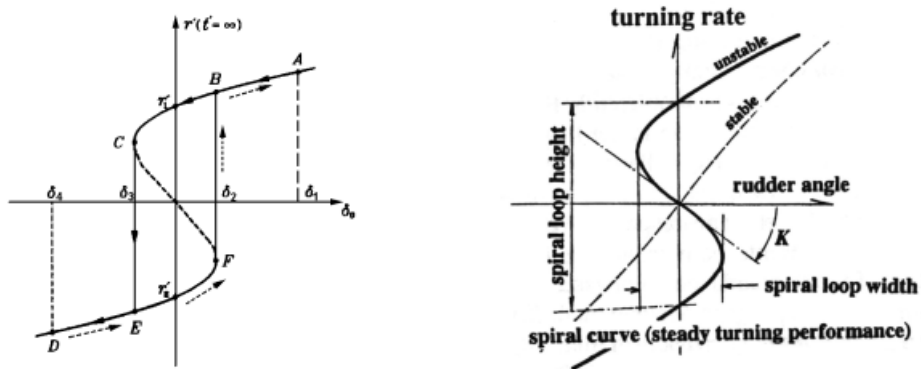


Fig. 5 Steady turning performance for instability ship

3.3 변침 및 보침성능

변침성능은 원하는 침로 즉 목표침로로 얼마나 빨리 도달하는가에 대한 척도를 나타낸다. 이와 같은 것은 Z-test의 Overshoot angle의 크기나 Yaw-check 시간으로써 알 수 있다. 조종성이 좋지 않은 선박 즉, 침로불안정한 선박일수록 Overshoot angle이 커지고 Yaw-check 시간이 길어진다. Fig. 6에서는 Spiral loop 폭이 다른 즉 각기 다른 침로안정성을 가진 선박의 Z-test의 결과를 보이고 있다. 이 Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 침로불안정한 선박일수록 Overshoot angle이 커지는 것을 알 수 있다.

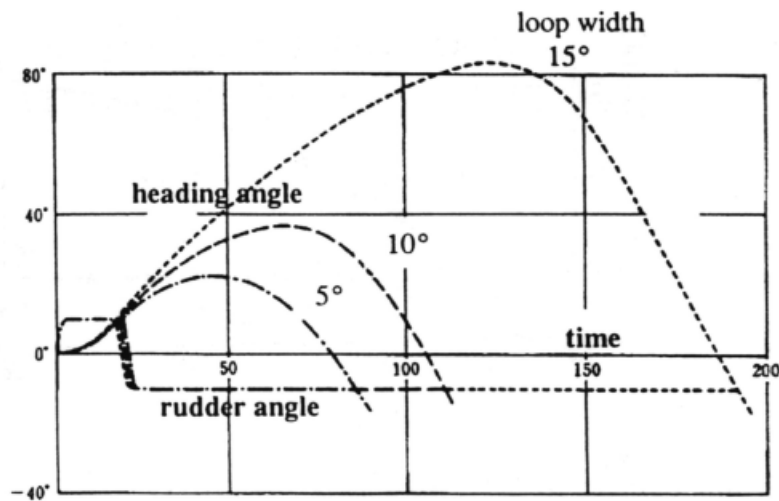


Fig. 6 Example 10deg Z-test for different spiral loop widths

보침성능이란 풍·파랑과 같은 외란 조건하에서 선박이 주어진 침로를 얼마만큼 잘 유지할 수 있느냐 하는 척도를 나타낸다. 즉 선박이 일정한 침로로 향해 중에 외란의 작용으로 그 침로가 바뀌었을 때 이 외란이 사라진 뒤에 일정한 침로로 정침하면 침로안정한 선박이고 그렇지 않다면 불안정한 선박이다. 이와 같은 예는 앞절의 Fig. 4를 보면 알 수 있다. 보침성능은 선체 뿐만 아니라 조타방법 또는 조타기 성능과도 관련이 있는데, 일반적으로 침로안정한 선박은 추종성이 양호할 뿐만 아니라 보침성능도 양호하다. 만일 보침성능이 좋지 않다면 조타수는 일정한 항로로 침로를 유지하고자 조타를 계속해서 해야 하며 이로 인해 조타수의 피로가 누적되고 그에 따른 경제적 손실도 커지게 될 것이다.

4 선박과 조종성의 채택

4.1 선박의 채택

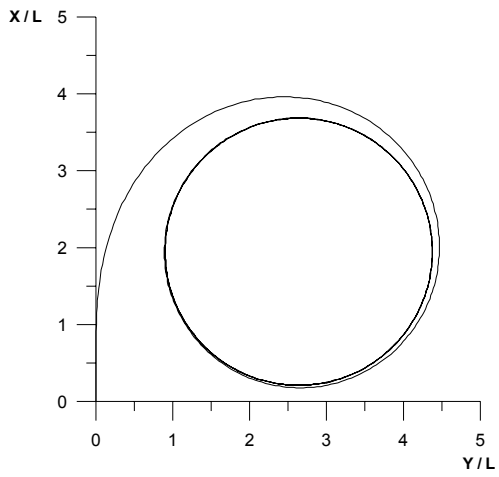
선박의 길이-선속비(L/V)가 작은 선박은 소형선이나 고속선을 의미하며, L/V가 큰 선박은 대형선이나 저속선을 의미한다. L/V 값은 선박의 조종성능에서 아주 중요한 역할을 하는데 그 이유는 다음과 같다. 선박의 조종운동은 조타(操舵)에 대한 선체의 응답(應答)으로서, 운항자의 명령타각에 대한 조타기(操舵機)의 응답속도가 조종운동에도 크게 영향을 미치게 된다. 한편, 조타기의 응답속도는 선박의 크기나 선속에 관계없이 거의 모든 선박에서 일정하다고 할 수 있다. L/V 값이 작으면 조타기의 응답속도가 선체운동에 비해 상대적으로 느려지고, L/V 값이 크면 조타기의 응답속도가 선체운동에 비해 상대적으로 빨라진다. 이 때문에, 동일한 침로불안정 레벨(즉, 같은 크기의 스파이럴루프폭)이라 하더라도 L/V 값이 작으면 Z-test 결과의 overshoot angle이 증가하며, 선박의 보침 조종이 어려워진다. 일반적으로 소형선이 침로불안정하면 거의 보침 조종이 불가능하지만, 대형선의 경우에는 침로불안정한 선박이라 하더라도 보침 조종에 큰 어려움이 없는 것으로 알려져 있는데, 이것은 위에서 언급한 이유 때문이다. 따라서 L/V 값은 조종성능 평가에 있어서 중요한 파라미터가 된다는 것을 알 수 있으며, IMO조종성기준에서도 L/V 값에 따라서 요구되는 기준치가 상이하게 되어 있다.

다음으로 선박의 침로불안정 레벨의 척도로서는 앞에서 언급한 스파이럴루프폭을 들 수 있다. 본 연구에서는 L/V값과 스파이럴루프폭을 파라미터로 하는 계통적 가상선박을 상정하고 이들 각각의 가상 선박에 대한 유체동역학적 특성을 구하여, 선박조종시뮬레이터의 선박 및 데이터베이스를 구축한다. 프로토타입(Prototype)의 선박으로 우리나라에서 최근 건조된 세 가지 형태(실습선, 컨테이너선, 벌크 캐리어)의 선박을 대상으로 하며, 이들의 주요목은 Table 2에서와 같다.

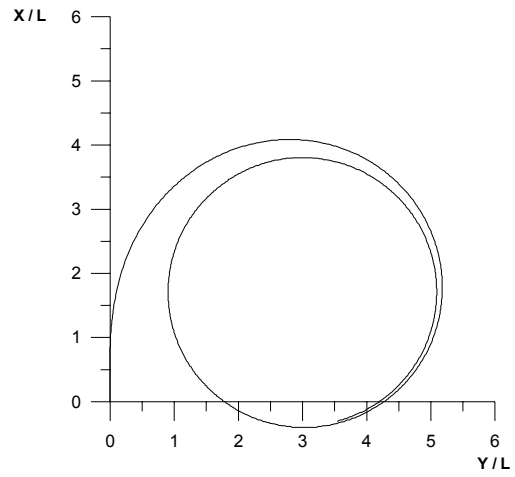
그리고 실제선박에 대한 기본적인 조종성 시험을 수행하였다. 기본 조종성시험은 수치 시뮬레이션을 통하여 이루어 졌으며 그 결과를 Figs. 7, 8, 9에서 보인다. 시뮬레이션 결과 세 선박 모두 양호한 조종성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

Table. 2 Principal Dimensions

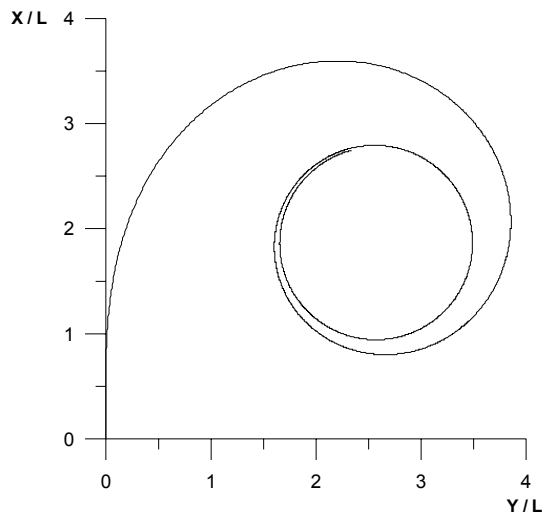
			Training ship (3,700 GT)	Container ship (4,300 TEU)	Bulk carrier (207,000 DWT)
Hull					
Length over all	L_{OA}	(m)	102.7	288.0	311.47
Length bet. per.	L	(m)	93.0	274.0	300.0
Breadth	B	(m)	14.5	32.25	50.0
Depth	D	(m)	7.0	21.7	25.7
Draft	d	(m)	5.2	13.5	18.0
Trim	τ	(m)	0	0	0
Block coef.	C_B		0.604	0.65	0.8388
Prismatic coef.	C_P		0.635	0.66	0.8401
Radius of gyration about z -axis	k_z/L_{pp}		0.24	0.24	0.25
Longitudinal center of gravity from midship	x_G/L_{pp}		0.006	-0.026	0.022
Rudder					
Area	A_R	(m ²)	10.11	57.3	86.2
Height	H	(m)	4.4	10.9	13.2
Aspect ratio			1.63	1.758	1.717
Area ratio	A_R/Ld		1/47.8	1/64.6	1/62.6
Propeller					
Diameter	D	(m)	3.55	7.8	8.7
Pitch Ratio (at 0.7R)	P/D		0.801	1.130	0.713
Expanded area ratio			0.62	1.0	0.4
Number of Blades			4	6	4



Hannara Turning Test V = 15knot



Container Ship Turning Test V = 23.5knot



Bulk Turning Test V = 13.5knot

Fig. 7 Turning test

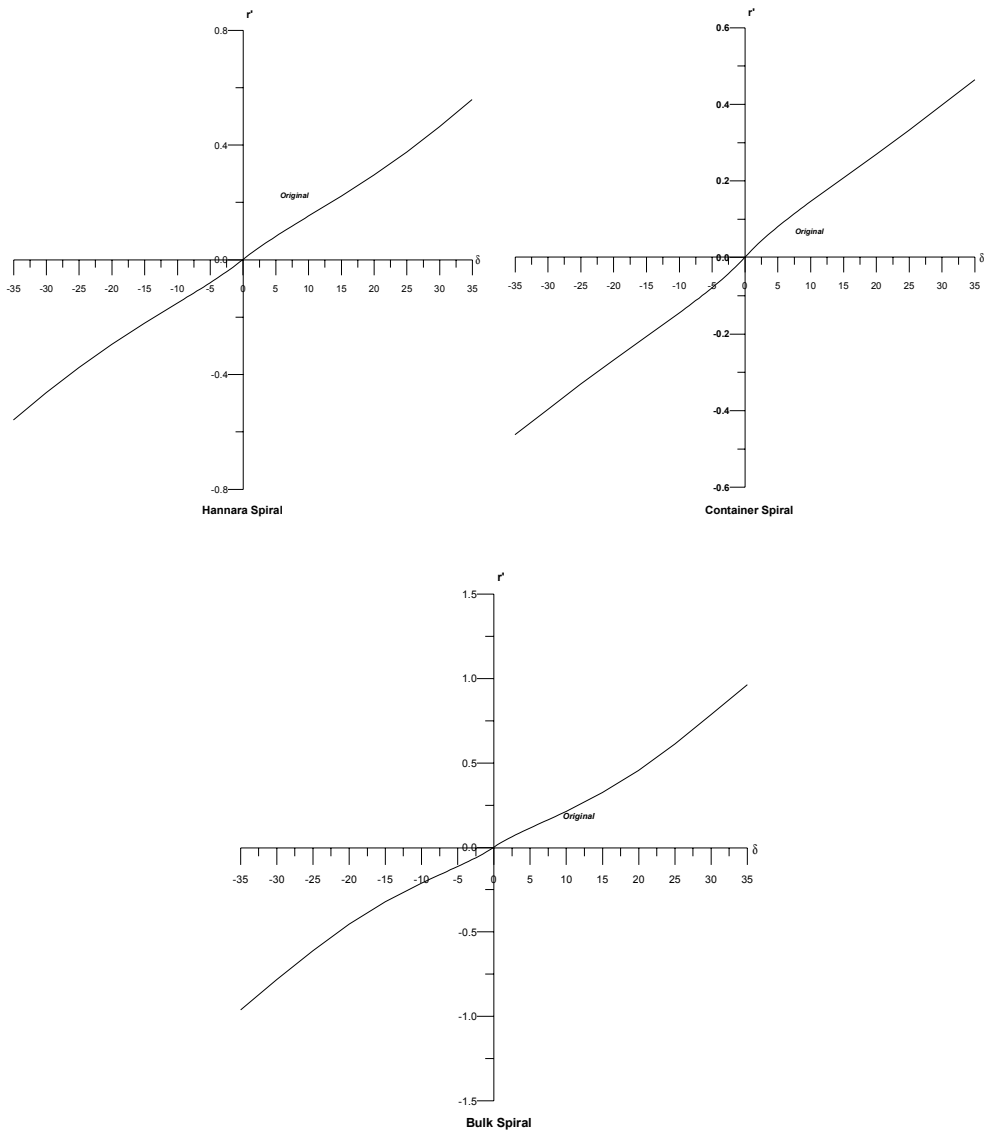
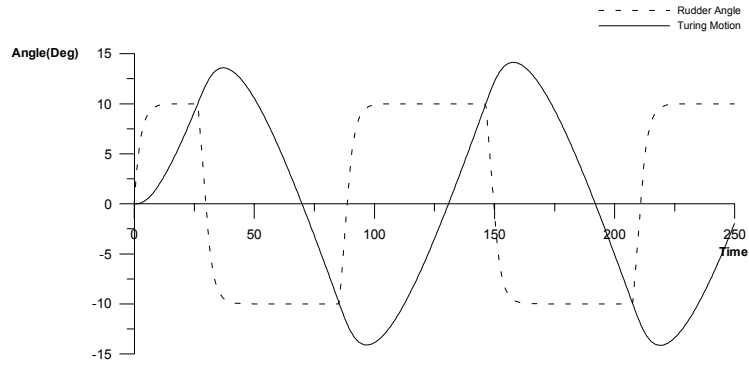
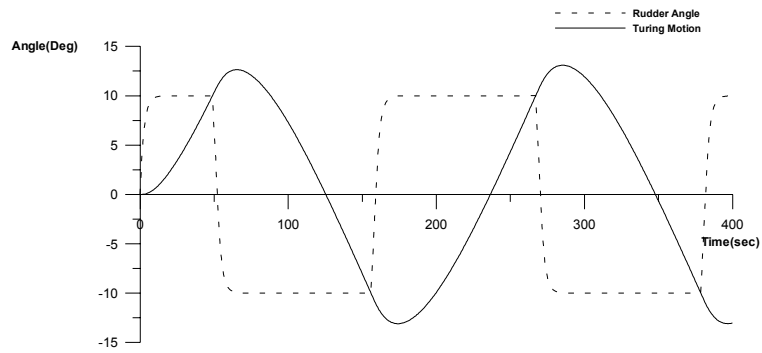


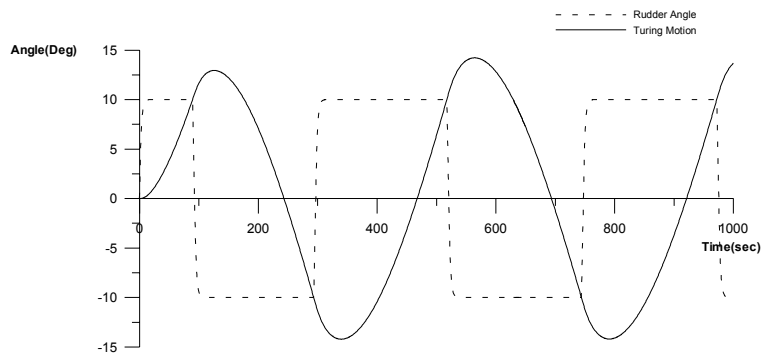
Fig. 8 Spiral Test



Hannara 10-10 Zig-Zag Test V = 15knot



Conatiner 10-10 Zig-Zag Test V = 23.5knot



Bulk 10-10 Zig-Zag Test V = 13.5knot

Fig. 9 10deg Z-test

4.2 조종성능의 변화

Fig. 10은 실제 선박으로부터 채택할 선박의 조종성 변화 과정을 보여주고 있다.

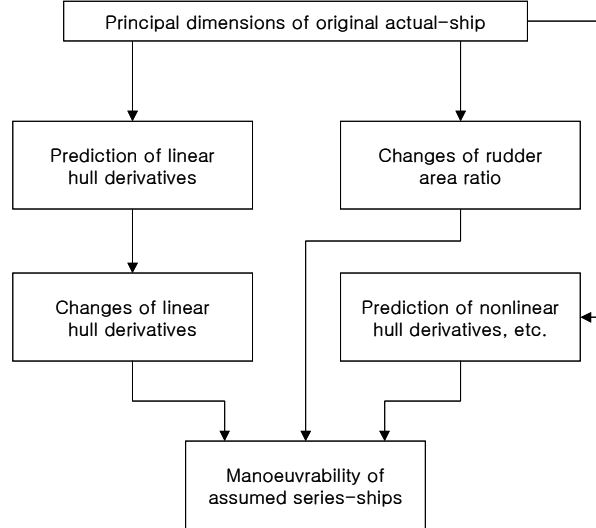


Fig. 10 Process of manoeuvrability prediction of assumed series-ships

침로안정 판별식

$$D = \frac{N_r'}{Y_r' - m'} - \frac{N_\beta'}{Y_\beta'}$$

에서 $Y_\beta' = -Y_v'$, $N_\beta' = -N_v'$ 로 나타낼 수 있으므로

$$D = \frac{N_r'}{Y_r' - m'} - \frac{N_v'}{Y_v'}$$

와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 선형 유체력미계수의 Inoue식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_v' &= -\left(\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4C_B\frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{2}{3}\frac{\tau}{d}\right) \\ N_v' &= -\Lambda\left(1 - \frac{0.27}{l_v'}\frac{\tau}{d}\right) \\ Y_r' &= \frac{1}{4}\pi\Lambda\left(1 + 0.8\frac{\tau}{d}\right) \\ N_r' &= -(0.54\Lambda - \Lambda^2)\left(1 + 0.3\frac{\tau}{d}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 τ : 트림변화량, $\Lambda = \frac{2d}{L}$, $l'_v = \Lambda / (\frac{1}{2} \pi \Lambda + 1.4C_B \frac{B}{L})$

식(7)에서 트림변화량은 없다고 한다면

$$Y'_v = -(\frac{1}{2} \pi \Lambda + 1.4C_B \frac{B}{L})$$

$$N'_v = -\Lambda \tag{8}$$

$$Y'_r = \frac{1}{4} \pi \Lambda$$

$$N'_r = -(0.54\Lambda - \Lambda^2)$$

같게 된다. 식(8)의 선형 유체력미계수를 변화시킴으로써 선박의 조종성능을 변화시킬 수 있다.

Frame line 형상 변화는 U형 선박(침로안정)을 Inoue 추정치로 간주하고 Fig. 11의 실험점으로부터 U형 선박에서 V형 선박으로의 변화는 선형적으로 변화하는 것으로 간주하여 직선의 방정식을 구하였다[6]. 이 직선의 방정식으로부터 점차 V형선박으로 변화시키면서 침로안정 판별을 한 뒤 그때의 값으로 Spiral loop width를 구하였다.

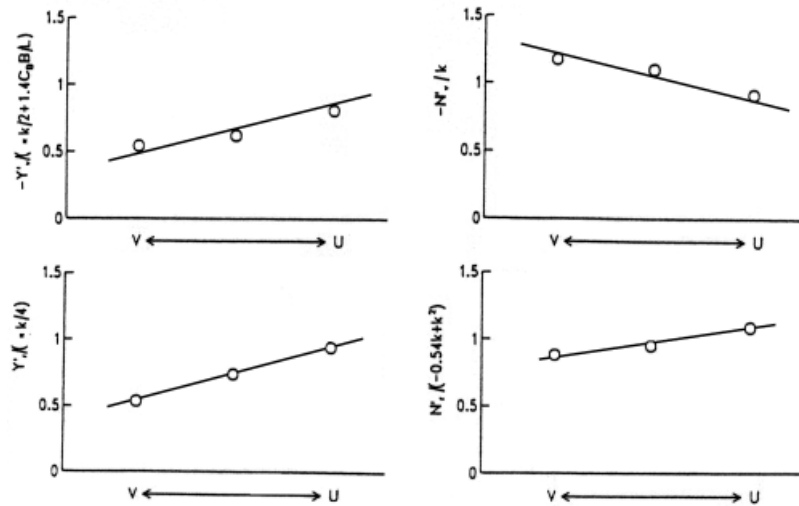


Fig. 11 The effect of stern flame shape on hydrodynamic derivatives

그러나, 앞에서 보인 Frame line 형상 변화만을 가지고는 원하는 Spiral 곡선을 얻을 수 없었기 때문에 선박의 침로안정의 판별을 할 수 있는 방법인 Stern profile 형상

변화를 이용하였다. 이 Stern profile 형상 변화 방법은 타면적비(A_R/Ld)를 변화시키는 방법이다. Fig. 12는 안정성지수와 타면적비와의 관계를 보인다. 이 그림으로부터 Stability index가 증가할수록 A_R/Ld 가 커짐을 알 수 있다.

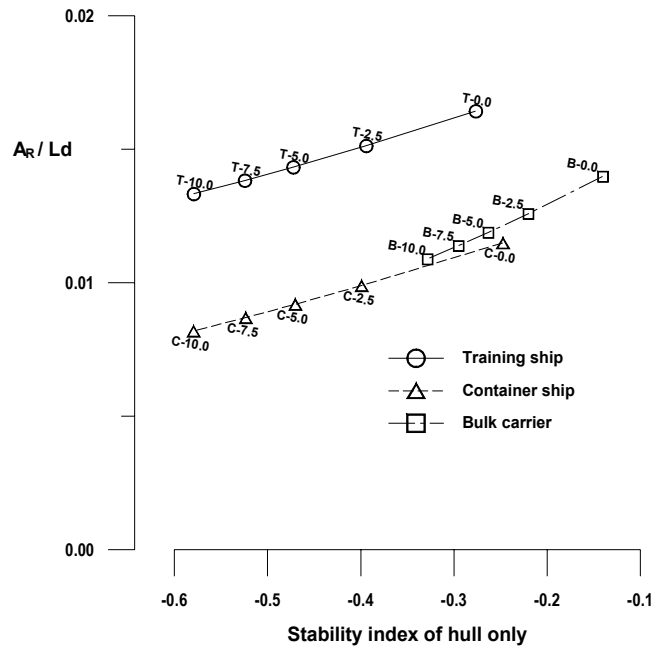
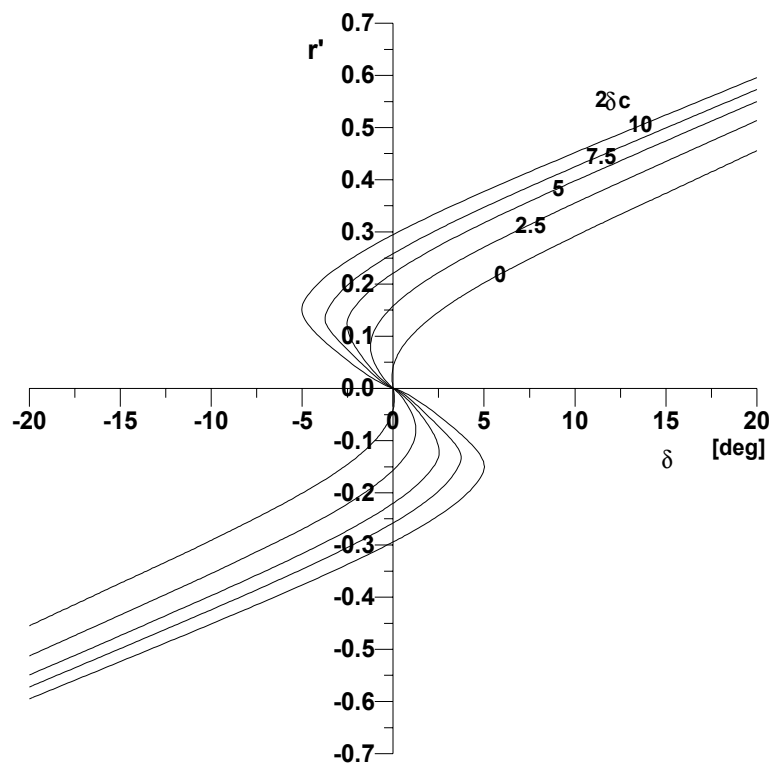
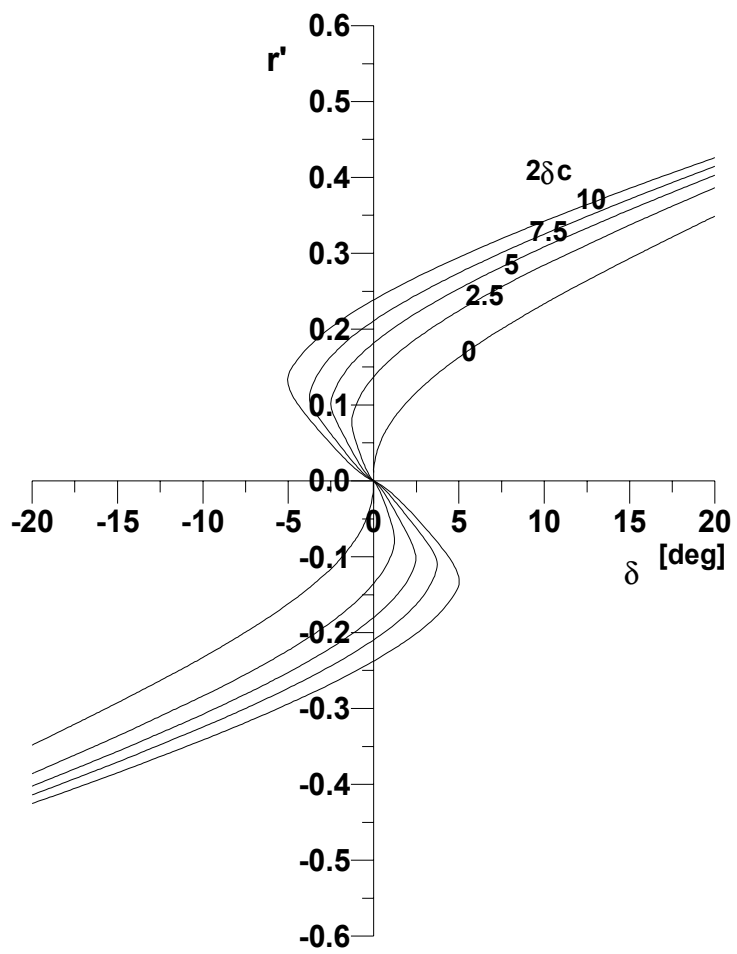


Fig. 12 Rudder area ratio and stability index for generation of assumed series-ships with different spiral loop widths

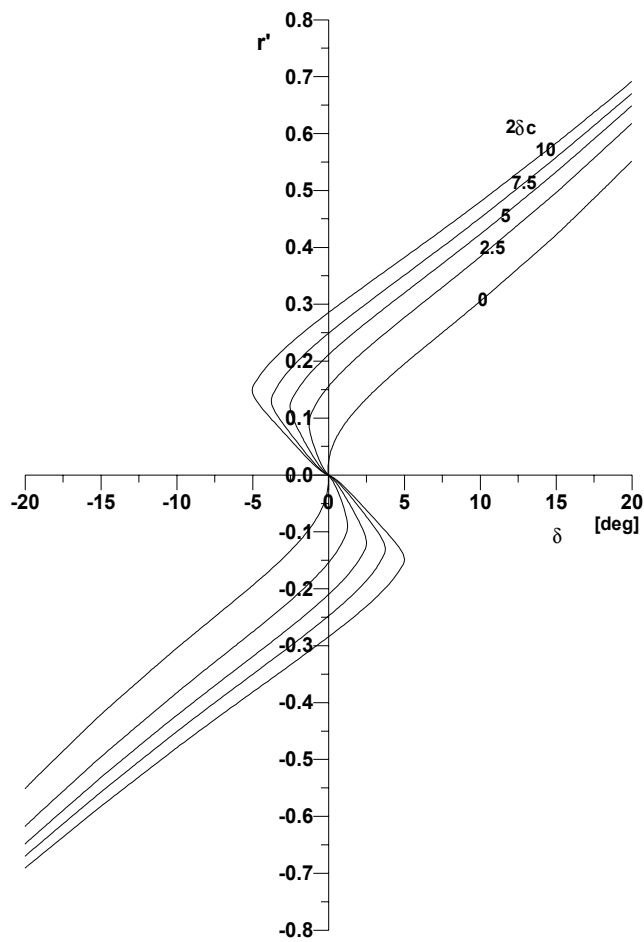
Frame line과 Stern profile을 동시에 변화 시킴으로서 Fig. 13과 같은 Spiral loop width($2\delta_c$)를 얻을 수 있었다. Figs. 14, 15, 16은 수치시뮬레이션의 Z-test의 결과를 나타내고 있다. 여기에서 나타내어진 수치시뮬레이션에서는 초기 선속은 실제선박의 디자인 속도로 하였다. 시뮬레이션 결과 Spiral loop 폭은 10deg Z-test의 First overshoot angle과 L/V 에 대해 깊은 관계가 있음을 보여 주며 10deg Z-test의 Second overshoot angle은 10deg Z-test의 First overshoot angle보다 약 2·3배 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 20deg Z-test의 First overshoot angle보다 10deg Z-test의 First overshoot angle이 2배 이상 큼을 알 수 있다.



(a) Training ship



(b) Container ship



(c) Bulk carrier

Fig. 13 Spiral curves of assumed series-ships with different instability on course

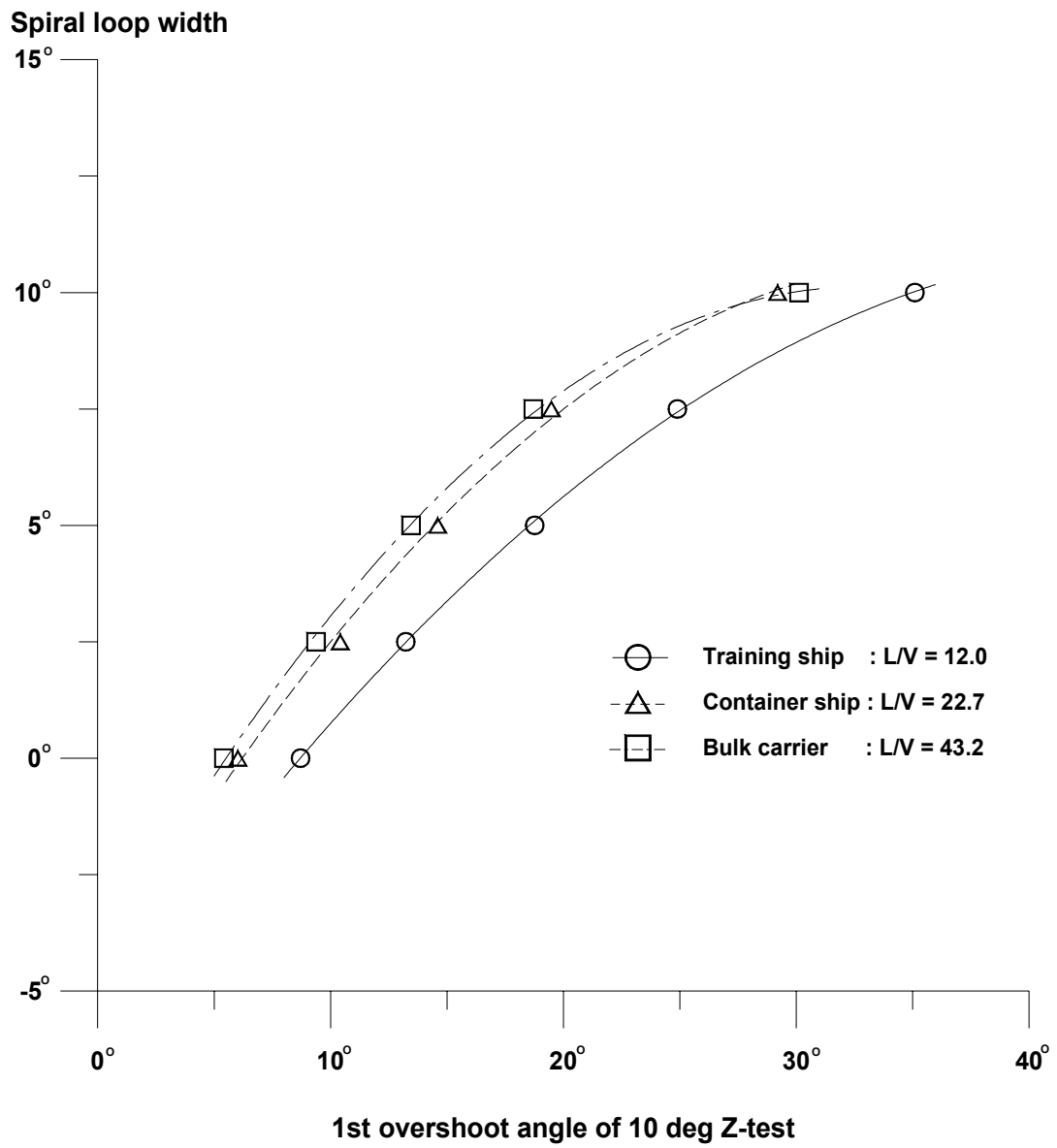


Fig. 14 Relation between spiral loop width and the 1st overshoot angle of 10 deg Z-test

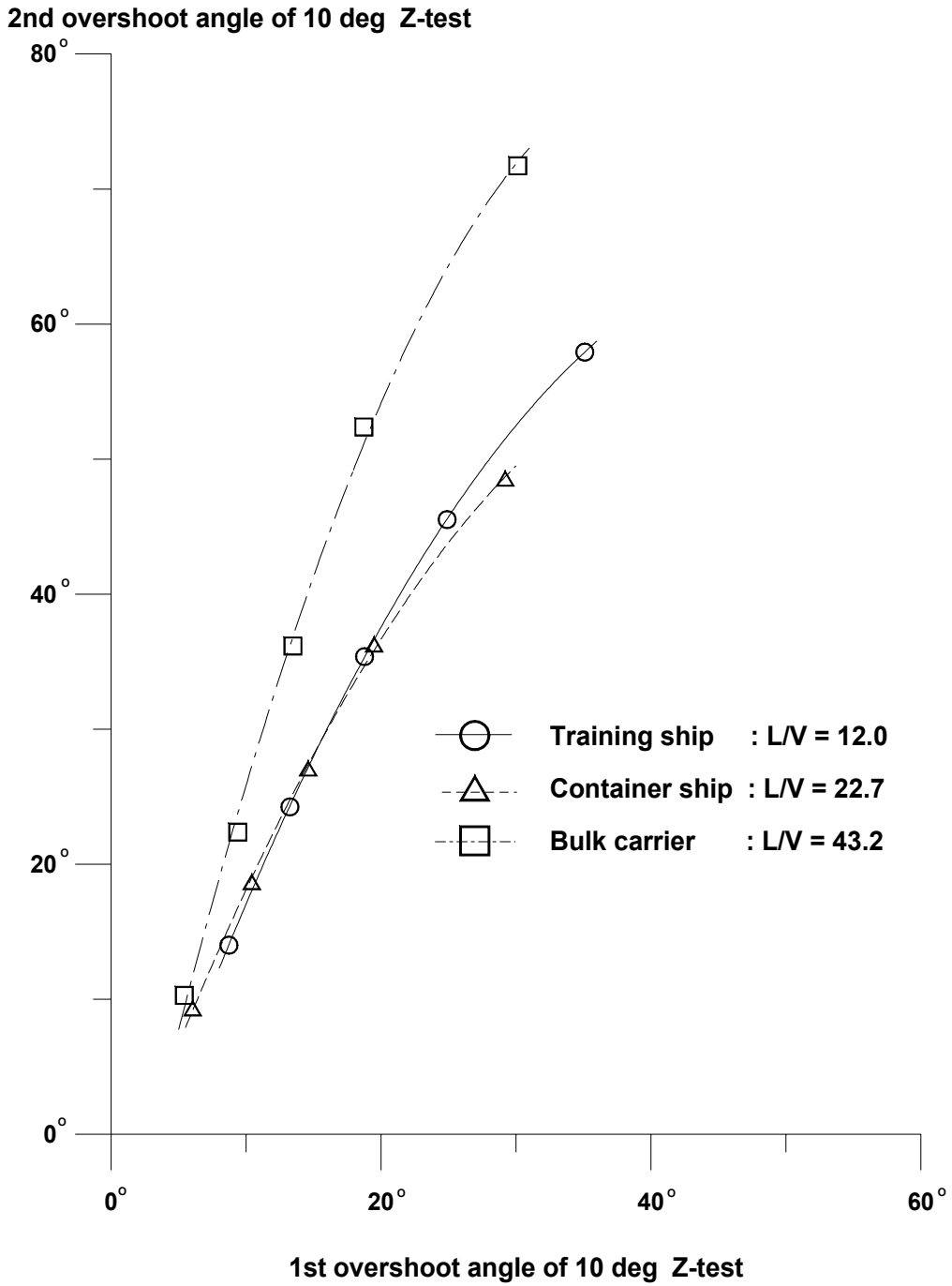


Fig. 15 Relation between the 1st and 2nd overshoot angles of 10 deg Z-test

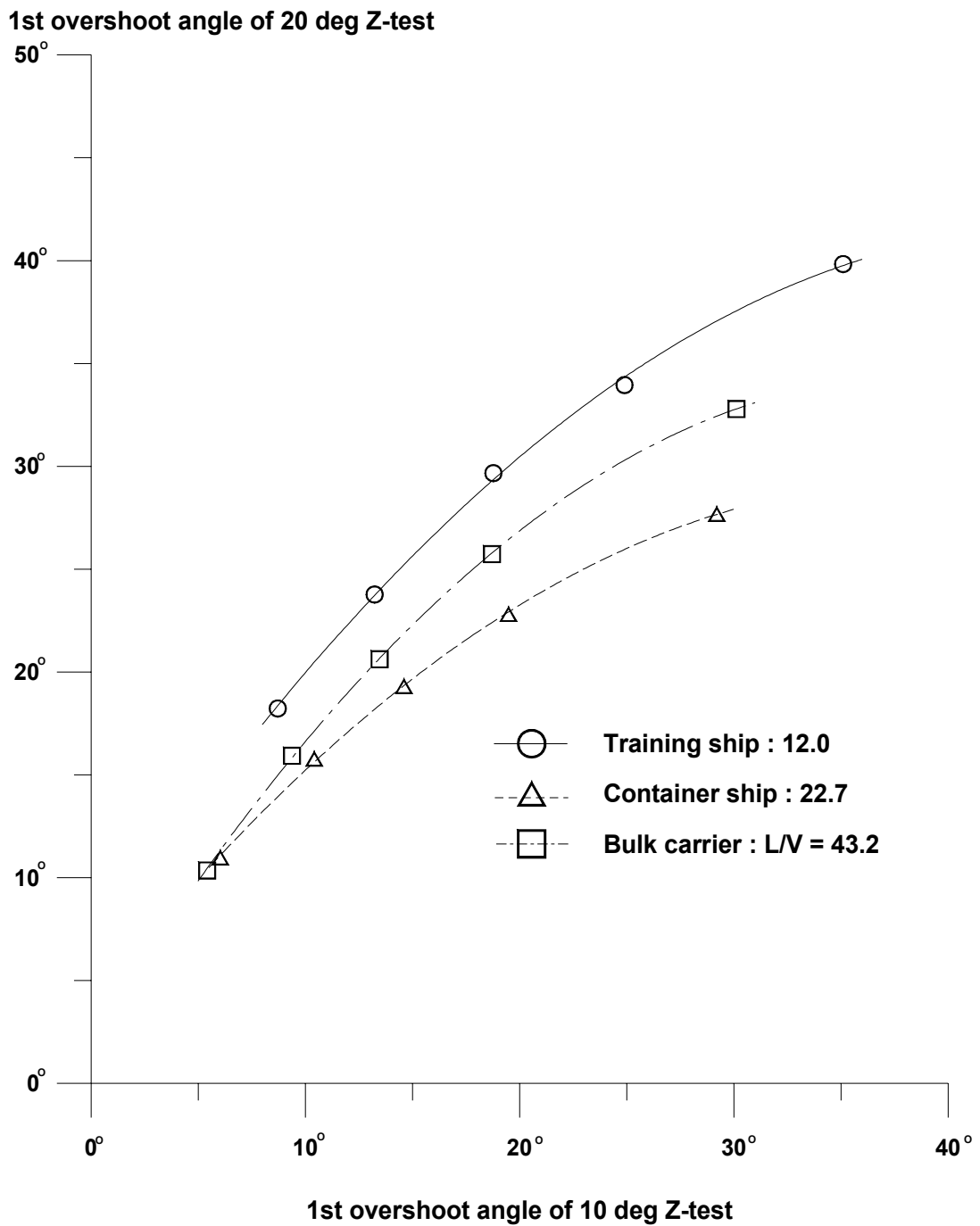


Fig. 16 Relation between the 1st overshoot angle of 10 deg Z-test and the 1st overshoot angle of 20 deg Z-test

5. 시뮬레이션 실험

5.1 시뮬레이션 모델링

본 논문에 이용한 선박조종시뮬레이터는 한국해양대학교 선박운동조종연구실에서 개발한 선박조종운동 시뮬레이터를 이용하였으며 그 구성은 Fig. 17에서 보는 것과 같이 Ship Dynamics Calculation, Operation Panel, Instructor Console, Navigational Indicators, 2D Bird's Eye View, 3D Bridge view로 구성이 되어 있다[7]. 3D Bridge view에서 나온 3차원 영상은 프로젝터를 사용하여 VR(Virtual Reality)를 실현하였으며 실제 Bridge에 있는 효과를 주었다. 여기에서 사용되어진 Projection system은 한국해양대학교 마린 시뮬레이터센터의 B-Bridge의 프로젝터를 이용하였다. 3D visual은 Fig. 17에서 보는 것과 같이 3개의 프로젝터를 사용하여 수평방향으로는 135deg, 수직방향으로는 30deg(위쪽 10deg, 아래쪽 20deg)를 비추고 있다. 또한 현실감과 거리감을 주기 위해서 약간의 안개처리를 하였다.

Fig. 17에서 보는 바와 같이 도선사가 명령을 내리면 조타수가 그 명령을 받아 Operation Panel에 입력하도록 하였다.

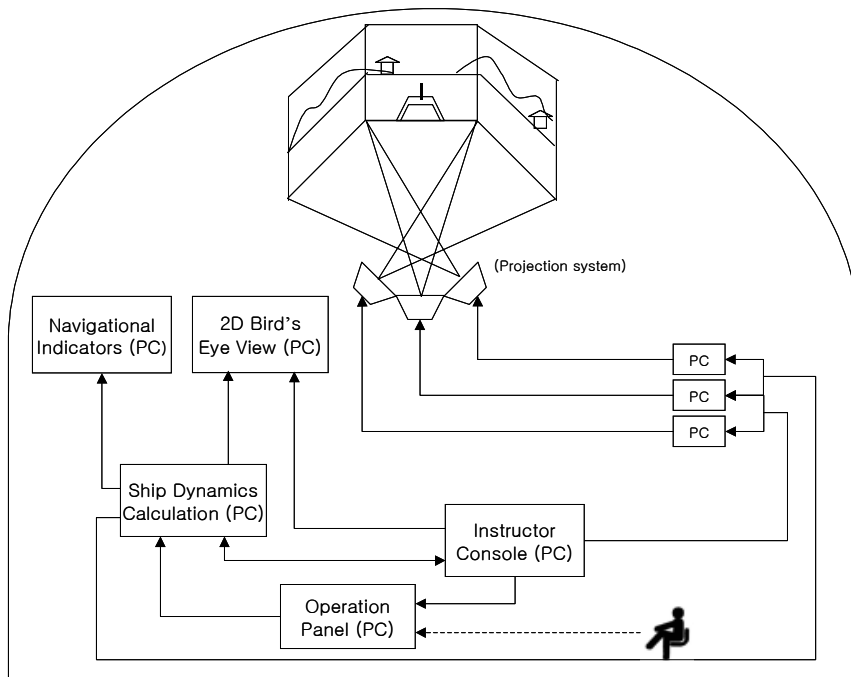


Fig. 17 System composition of the present simulator

침로불안정의 허용한계 조사를 위해서는 조타수에 의한 침로제어 방법과 도선사에 의한 협수로제어로 나눌 수 있는데 본 논문에서는 도선사에 의한 협수로제어의 실험하였다. 실험할 지형으로는 폭이 좁고 길이가 긴 항로로 얼마 정도의 곡선을 이루고 있는 지형을 선택하여야 했는데 Fig. 18에서 보는 것과 같이 인천항이 연구 목적과 부합되는 곳이라 생각하여 지형데이터 베이스를 구축하고 3차원으로 모델링 하였으며 약간의 항로 수정을 가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 East waterway(입항을 하기 위한 항로)로 실험을 수행했다. 수심은 충분히 깊은 곳이며 외란으로서 바람과 조류를 고려하였는데 풍속은 10m/sec, 풍향은 WNW(293deg), 조류의 방향은 050deg에서 추파(following sea)로 2kt의 속도로 정하였다.

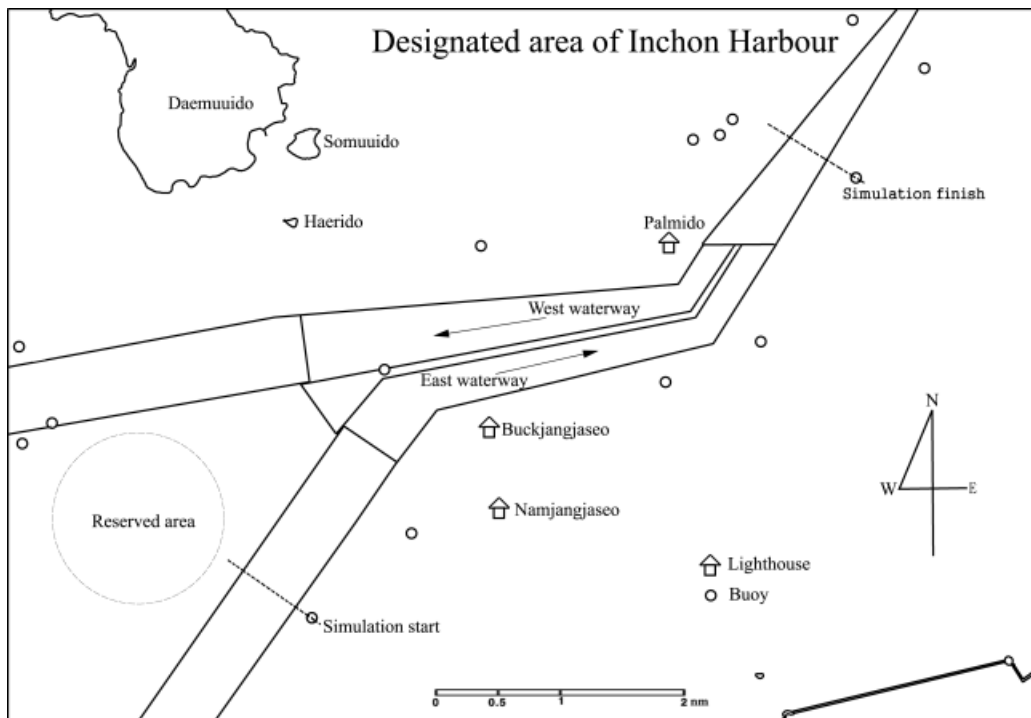


Fig. 18 Waterway employed for simulator study

사용되어진 실제 선박은 MultiGen을 이용하여 3차원으로 모델링하였고 Vega를 이용하여 렌더링하였다. 세척의 영상은 실제모델을 사용하였으며 수식적으로만 운동성능 및 조종성능을 변화시켰다. Fig. 19, 20, 21은 실제 완성된 시뮬레이터에서 각 선박의 Bridge에서 바라본 장면을 보이고 있으며 Fig. 22는 Bridge mock-up의 정면에서 바라본 실습선(한나라)의 장면이다.

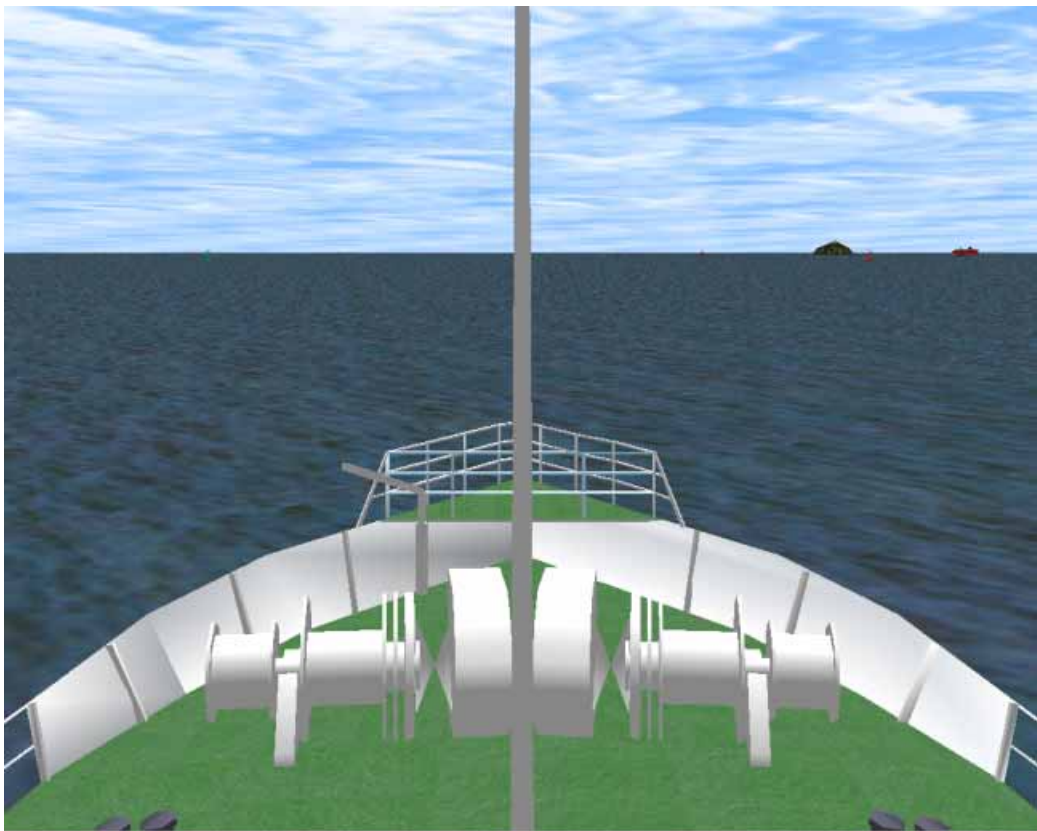


Fig. 19 Captured 3D view seen from bridge of training ship

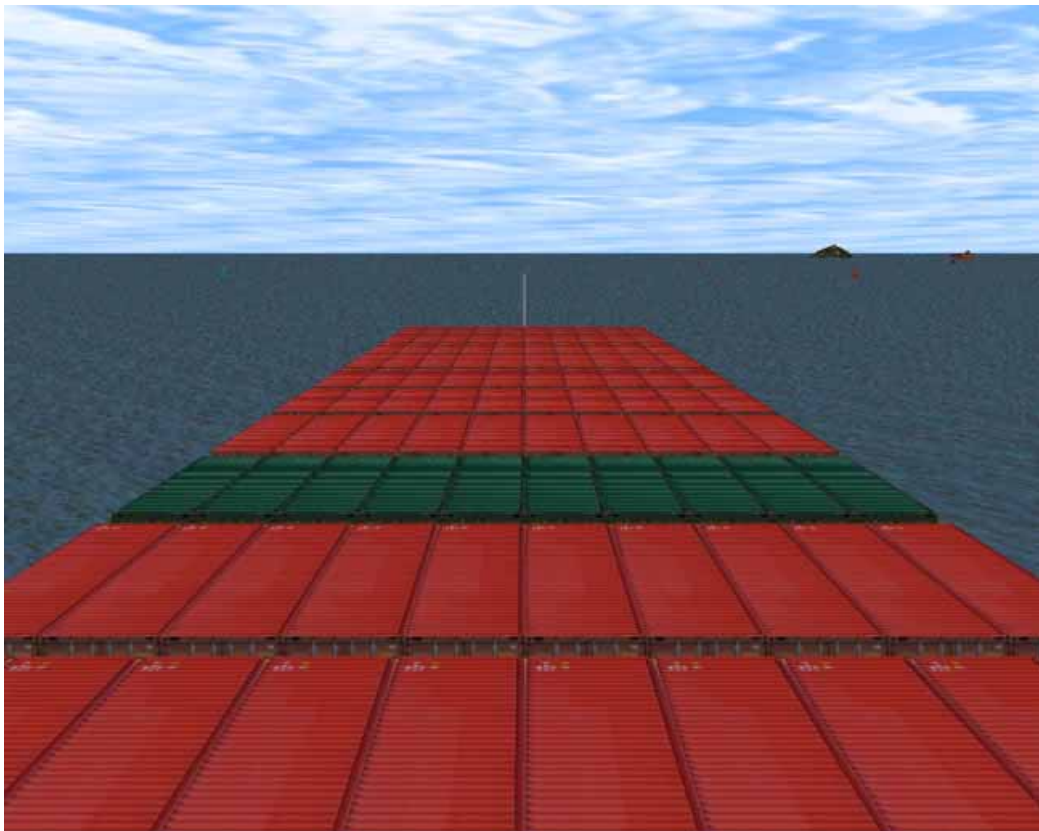


Fig. 20 Captured 3D view seen from bridge of container ship

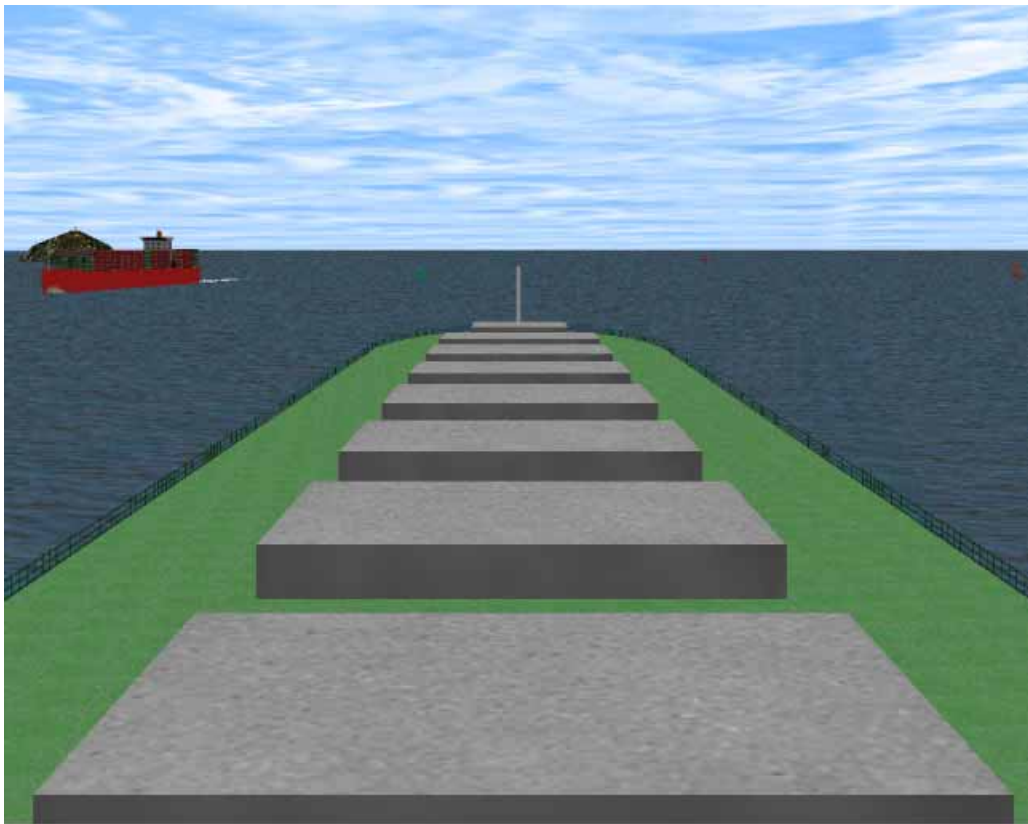


Fig. 21 Captured 3D view seen from bridge of bulk carrier

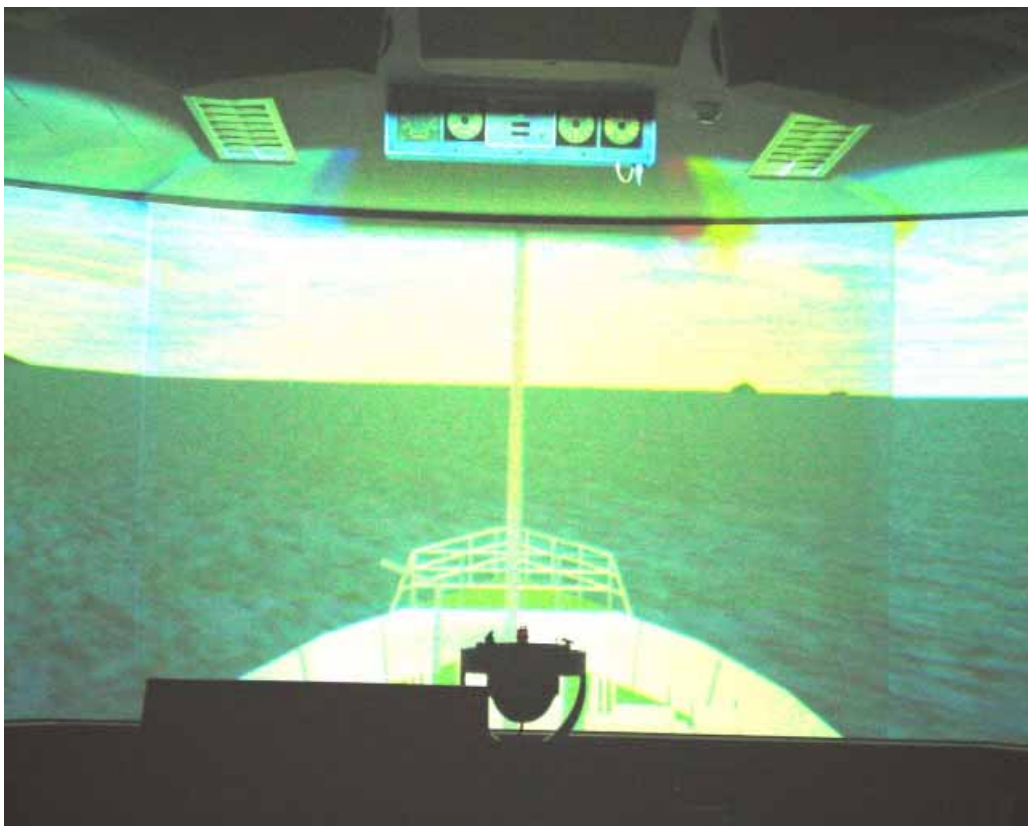


Fig. 22 Actual front-view seen from bridge mock-up of present simulator

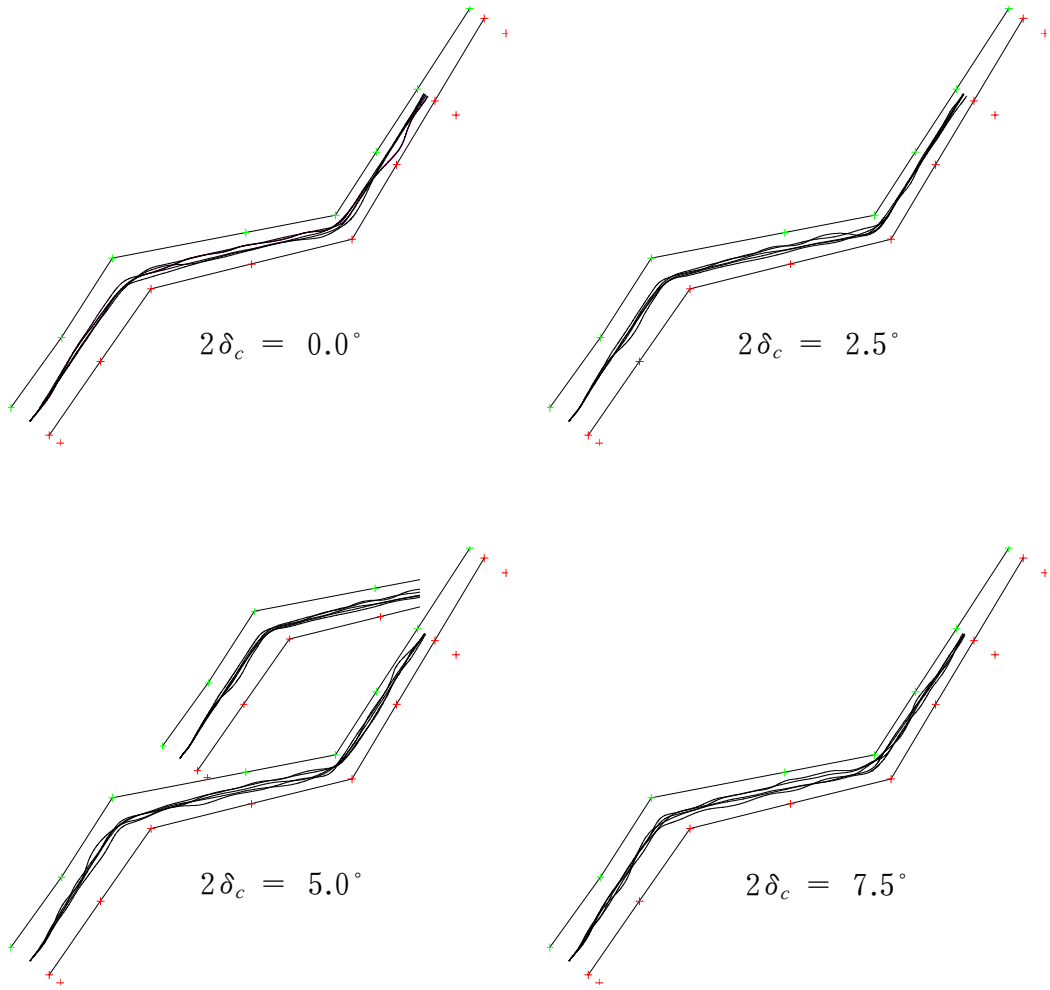
5.2 시뮬레이션 실험 및 고찰

시뮬레이션 실험 시 도움을 준 도선사(Pilot)들은 15년 이상 상선(商船)의 운항경력을 가지고, 경력이 5년 이상인 도선사로 구성되었다. 시뮬레이션 시작 전에 본 실험의 목적, 선박의 주요목이나 조종성능 상태, 항로, 외란의 조건, 시뮬레이션 미션(Mission) 조건 등을 설명하였으며 시뮬레이션의 미션은 다음과 같다.

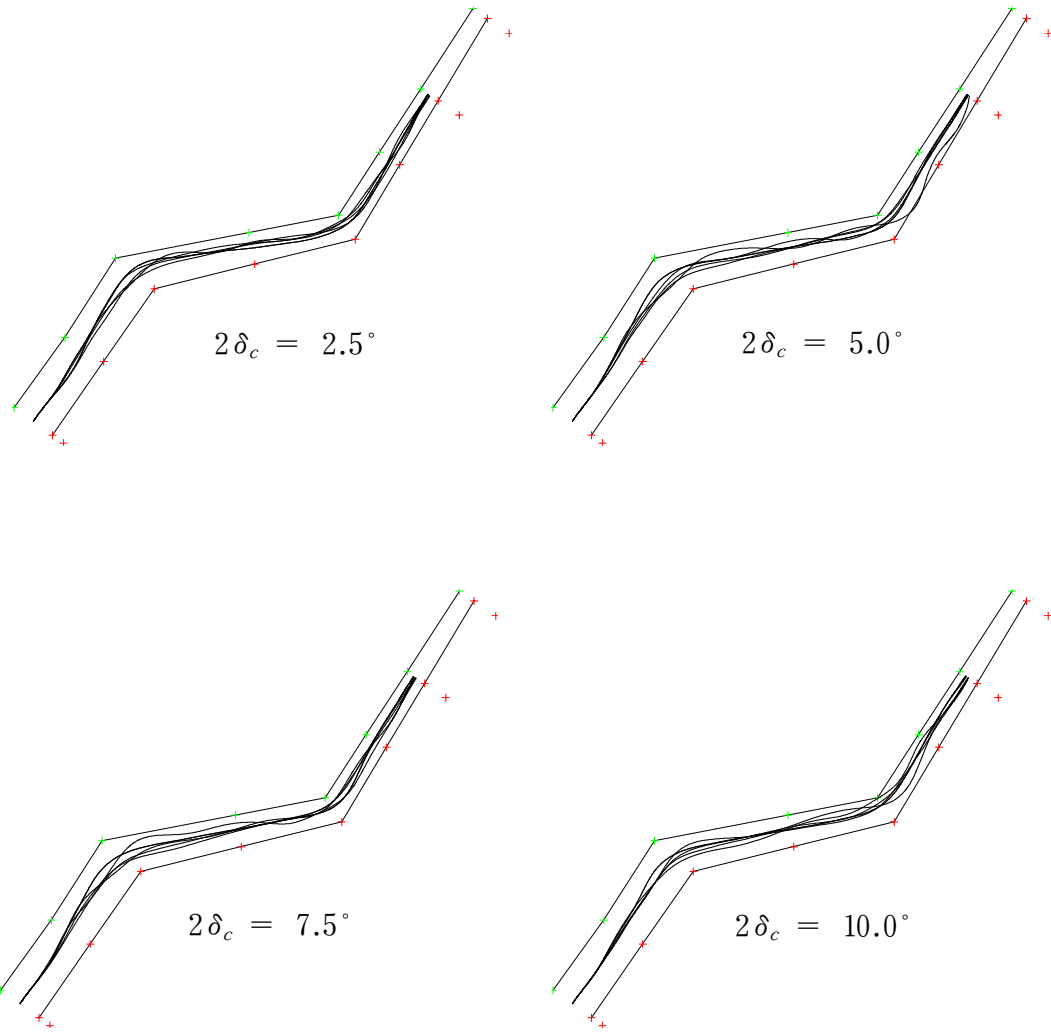
- 가능한 한 항로의 중앙을 운항해서 가야한다.
- 프로펠러의 RPM은 Harbour full speed로 일정하게 한다.
여기에서 Harbour full speed는 실습선이 12kt, 컨테이너선이 17.6kt, 벌크캐리어는 10.8kt 이다.
- 타각에 대한 명령만을 내릴 수 있으며 명령은 구두로써 조타수에게 내려야 한다.

시뮬레이션은 한 도선사가 조종성을 변화시킨 선박을 차례대로 운항하는 것으로 하였다. Fig. 23은 시뮬레이션을 하는 동안에 각 선박들의 항적(航跡)을 나타내고 있다. 여기에서 보는 바와 같이 선박의 조종성능이 나빠지더라도 실험의 미션을 완벽히 수행하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이 항적으로써는 조종성능의 저하여부에 대한 어떠한 관련성을 찾아 볼 수 없었다. 이와 같은 결과는 조종자가 많은 경험과 실력이 있다는 것과 같은 종류의 선박을 조종함으로써 조종성능이 저하되더라도 반복에 의한 익숙해짐의 결과라고 생각되어진다.

항로의 중앙으로부터 벗어난 횡편이량에 대한 표준편차와 Spiral loop width와의 관계는 Fig. 24에서 보인다. Spiral loop width가 큰 선박일수록 횡편이량이 커질 것이라고 기대 했지만 같은 선종에 대해서는 그에 대한 여부를 찾기 힘들었다. 오히려 Spiral loop width가 커질수록 횡편이량이 줄어들고 있는 경향을 보이고 있으며 이와 같은 이유는 앞서 말한 바와 같다.



(a) Training ship



(b) Container ship

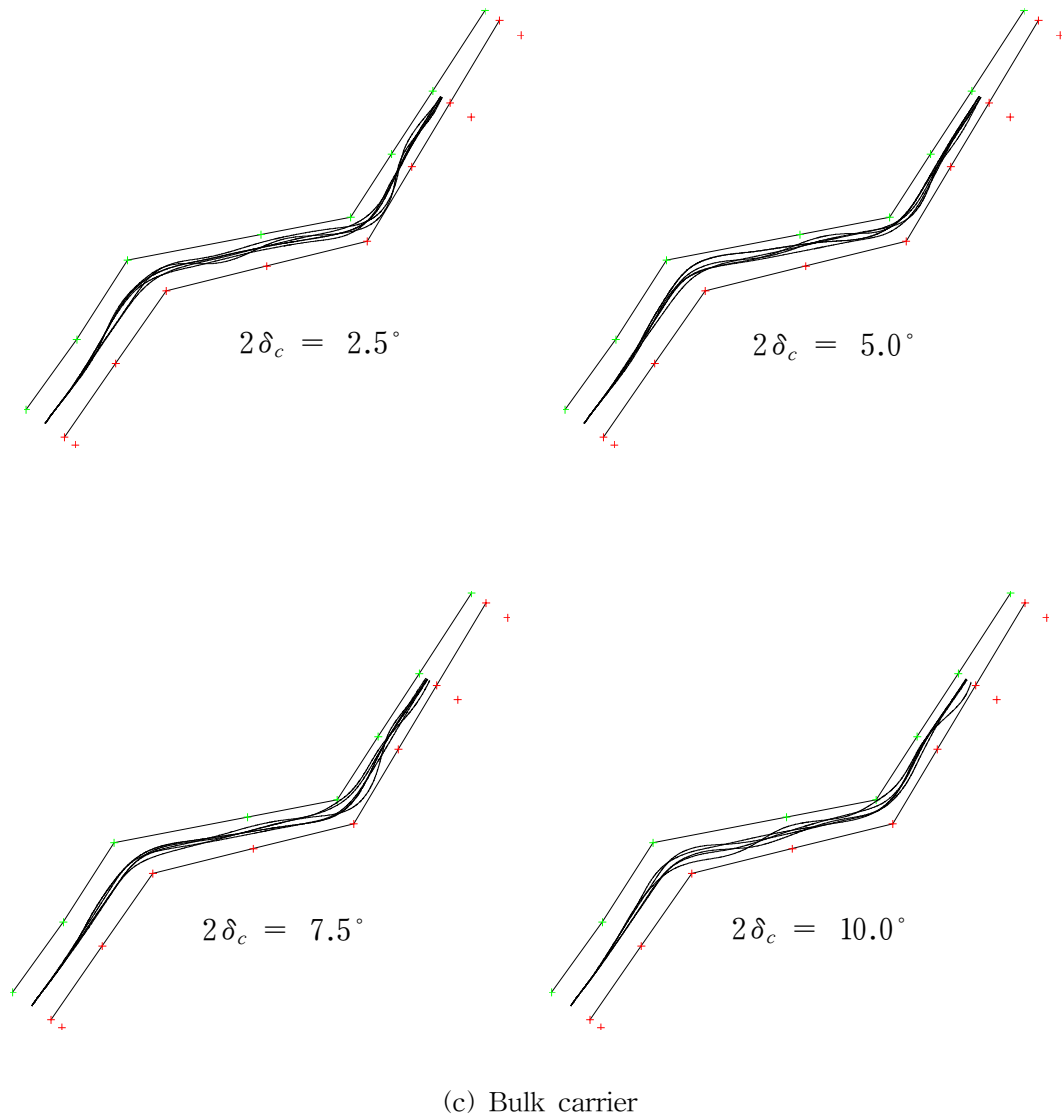


Fig. 23 Trajectories of assumed series-ships during the simulations

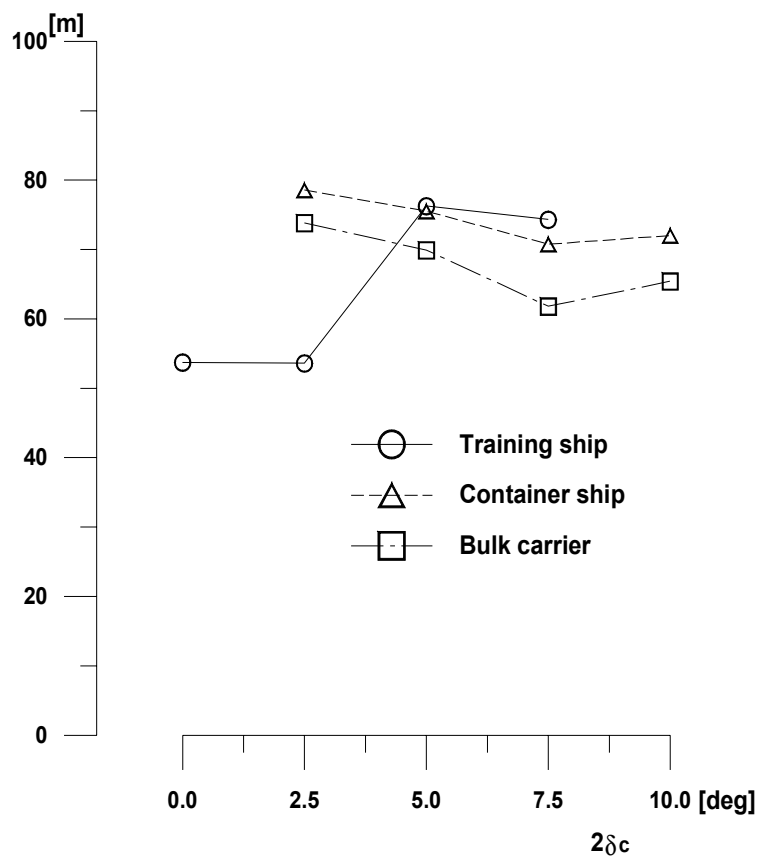


Fig. 24 Averaged-root-mean square values of lateral deviations

Fig. 25는 타각에 대한 표준편차와 Spiral loop width와의 관계를 나타내고 있다. Spiral loop width가 커질수록 타각이 증가했음을 보이며 이것은 타의 사용량이 많아졌음을 보여 준다. Fig. 25로부터 L/V가 커질수록 또한 침로불안정 할 수록 타각이 커지고 있으며 타 사용량이 많음을 알 수 있다.

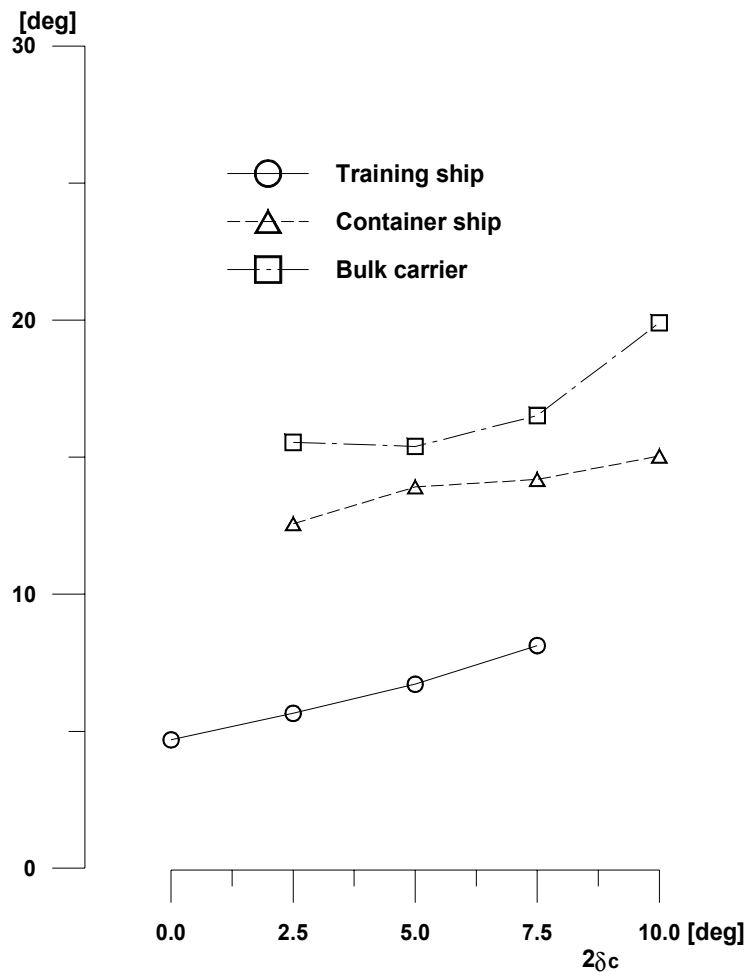


Fig. 25 Averaged root-mean-square values of rudder angles

시뮬레이션 실험을 수행하면서 도선사들에게 각 선박에 대해 주관적인 평가를 기록하도록 하였는데 그 주된 내용은 기술의 요구도(Skill required), 조종의 곤란도(Difficulty of task), 스트레스의 정도(Stress level)를 기술하는 것이었다. 각 항목에 대해 0에서 9까지의 10등급에 대해 자신이 느끼는 정도를 표시하게 하였다. 즉 등급이 높을수록 많은 기술을 필요로 하고, 조종이 곤란하며, 스트레스의 정도가 높았음을 나타낸다. 이 평가는 한 척의 시뮬레이션이 끝나면 바로 평가하게 하였다. Fig. 26은 이러한 도선사의 주관적 평가의 평균과 Spiral loop width와의 관계를 보여 주며 총 5명의 도선사가 운항한 선박의 평균치이다. 이것은 도선사의 주관적인 평가가 Spiral loop width와 관계가 깊은 연관성이 있음을 보여준다.

다음으로 Fig. 27은 Spiral loop width와 관계가 있는 타각에 대한 표준편차와 도선사의 주관적인 평가의 관계를 보여 준다. 여기서 도선사의 주관적인 평가 등급이 높을수록 타각이 커지고 있는 것을 알 수 있으며 도선사가 어려움을 느끼는 것 만큼 타의 사용 빈도가 높아졌음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 28은 변침 및 보침성능에 대한 IMO 조종성 기준과 도선사의 주관적인 평가 등급을 함께 도시하고 있다. 10deg Z-test의 First overshoot angle에서 L/V가 25sec 주위의 IMO 한계위치에서 난이도는 약 5정도로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 다른 Z-test의 IMO 한계위치에서도 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 Figs. 27, 28 에서 보는 바와 같이 10deg Z-test의 Second overshoot angle과 20deg Z-test의 First overshoot angle은 L/V가 40sec 정도 또는 그 이상에서 10deg Z-test First overshoot angle보다 IMO 조종성기준이 엄격함을 알 수 있다. 또한 같은 Spiral loop width를 가지는 선박이라도 L/V가 큰 선박이 L/V가 작은 선박보다 조종이 곤란함을 보이고 있다.

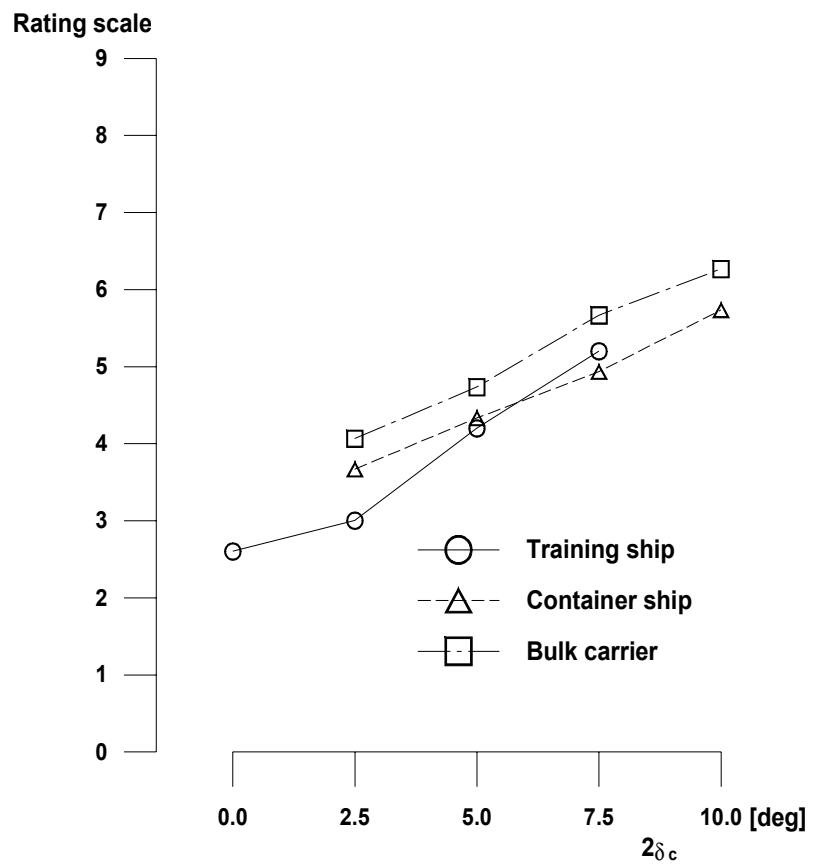


Fig. 26 Averaged subjective evaluation rating scales by pilots

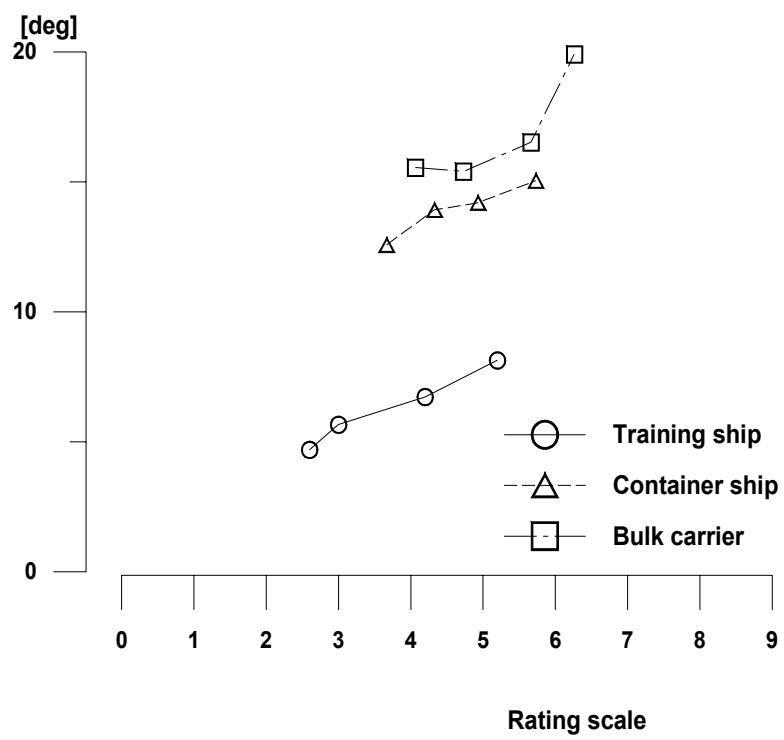
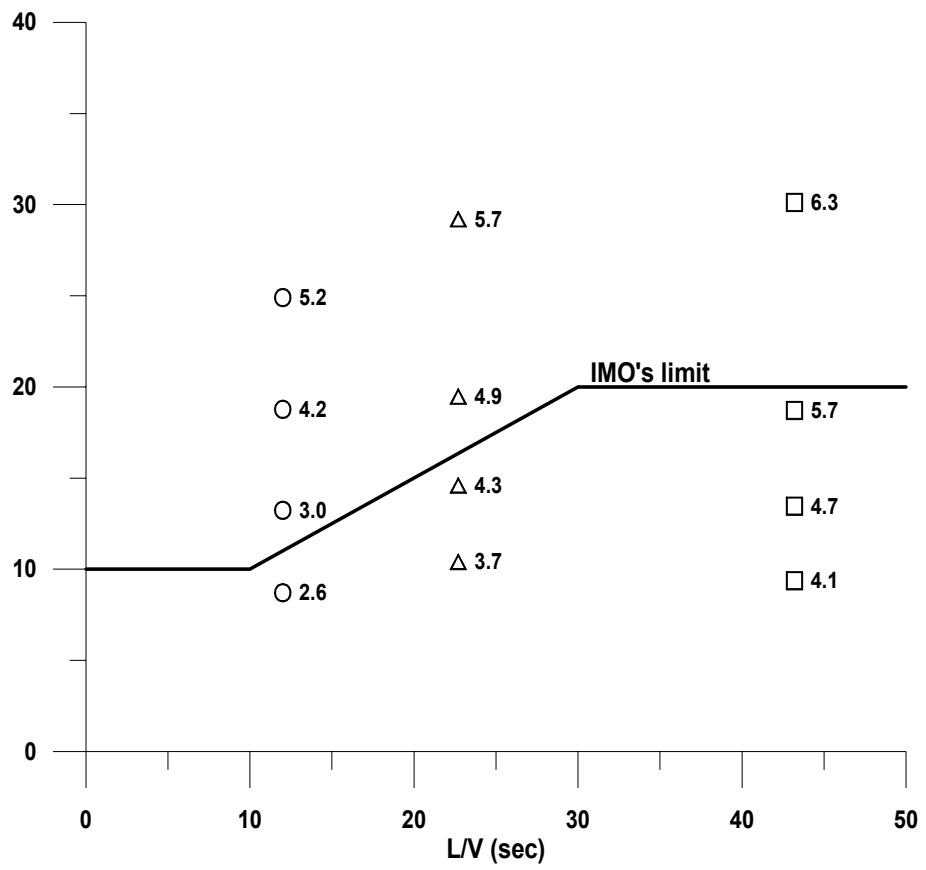


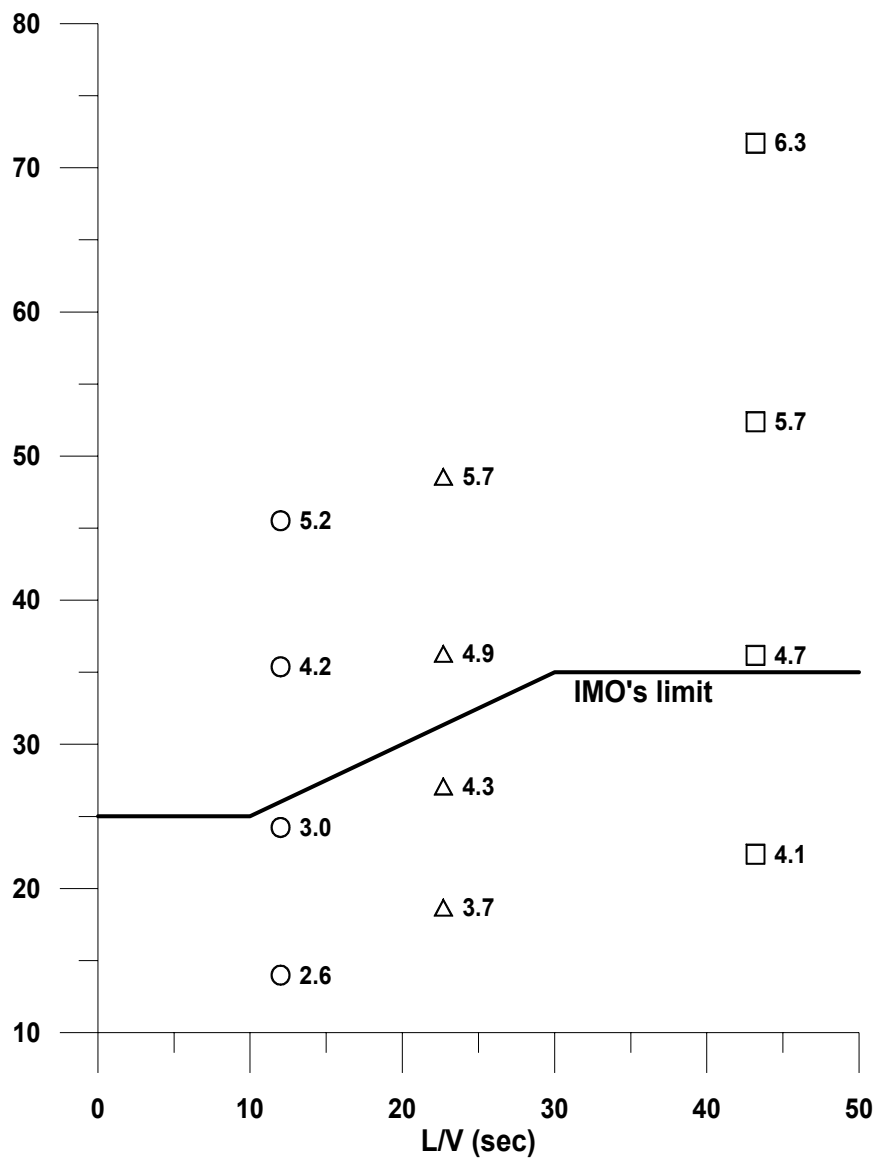
Fig. 27 Correlation between averaged subjective evaluation rating scales and averaged root-mean-square values of rudder angles

1st overshoot angle of 10 deg Z-test



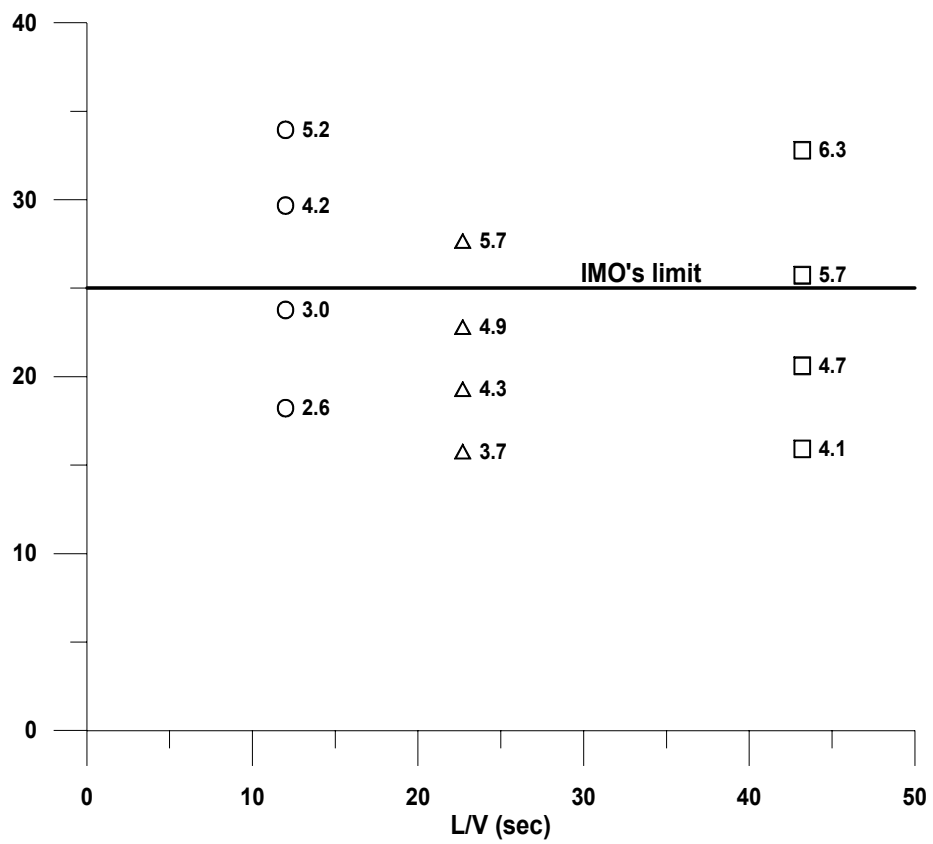
(a)

2nd overshoot angle of 10 deg Z-test



(b)

1st overshoot angle of 20 deg Z-test



(c)

Fig. 28 Averaged subjective evaluation rating scale marked on IMO's standard diagram

6. 결 언

본 논문에서는 실습선, 컨테이너선, 벌크 캐리어 이 세 척의 선박을 채택하여 각기 다른 12가지 경우의 침로안정의 조건에서 시뮬레이터실험을 수행하였다. IMO 조종성 기준에서 변침 및 보침성능에 초점을 맞추어 행하였으며 각 선박의 L/V와 Spiral loop width를 계통적으로 변화 시켰다. 또한 도선사의 주관적인 평가로서 실제로 인간이 느낄 수 있는 조종의 곤란함을 보였다. 이로써 다음과 같은 사항들을 알 수 있게 되었다.

- (1) 항로중심으로부터 선박의 횡편이량은 침로불안정성과의 어떤 상관관계도 찾을 수 없었다. 그리고 선박이 침로불안정사여도 항로를 유지할 수 있으며 그 편이량은 조종의 숙련도, 기술로써 극복할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 시뮬레이션을 행하는 동안 즉 선박이 침로불안정해 질수록 조타량이 커지며 조타의 사용빈도가 높아짐을 알 수 있었다. 주관적인 평가 또한 마찬가지로 그 등급이 높아짐을 알 수 있었다.
- (3) 비록 Spiral loop width가 같은 그룹의 선박이라 하더라도 L/V가 큰 선박이 L/V가 작은 선박보다 조종하기 어렵다.
- (4) 몇몇 대형선박이 IMO기준을 만족하더라도 도선사가 좁은 항로를 조종해 나가는 것이 어렵다고 느끼며 반대로 IMO 조종성기준을 만족하지 못하는 소형선박은 비교적 조종하는 것이 어렵지 않다고 느끼고 있다.
- (5) 10deg Z-test의 Second overshoot angle과 20deg Z-test의 First overshoot angle은 몇 가지의 경우에 대해서는 10deg Z-test First overshoot angle보다 IMO 조종성기준이 엄격함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] IMO : Interim standards for ship Manoeuvrability, Resolution A. 751(18), 1993
- [2] Shon, kyounggho : Hydrodynamic Forces and Manoeuvring Characteristics of Ships at Low Advance Speed, Transaction of th Society of Naval Architects of Korea, Vol. 29, No.3, 1992, pp.90-101
- [3] Inoue, Shosuke, te al : Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring, International Shipbuilding Progress, Vol.28, NO.322, 1981, pp.112-125
- [4] van Lammeren, W.P.A., et al. : The Wageningen B-Screw Series, Transaction of SNAME, Vol. 77 (1969), pp.269-317
- [5] Shon, kyounggho : Ship motion & Manoeuvring
- [6] Yoshimura, Yasuo, et al : Prediction of Full scale Manoeuvrability in Early Design Stage, Chapter 3 of Research on ship Manoeuvrability and its Application to Ship Design, the 12th Marine Dynamic Symposium, the Society of Naval Architects of Japan, 1995, pp.111-112
- [7] Sohn, Kyounggho, et al. : System Configuration of Shiphandling Simulator Based on Distributed Data Processing Network with Particular Reference to Twin-screw and Twin-rudder Ship, Proceedings of Korea-Japan Joint Workshop on Marine Simulation Research, Pusan, Korea (2001), pp.169-187