

# 타력 증대가 저속 운항 선박의 조종성능에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

김현준<sup>1</sup>·김상현<sup>2,†</sup>·김동영<sup>2</sup>·김인태<sup>2</sup>·한지수<sup>2</sup>  
대우조선해양<sup>1</sup>  
인하대학교<sup>2</sup>

## A Numerical Study on the Effects of Maneuverability of Ship with Low Forward Speed by Increasing Rudder Force

Hyun-Jun Kim<sup>1</sup>·Sang-Hyun Kim<sup>2,†</sup>·Dong-Young Kim<sup>2</sup>·In-Tae Kim<sup>2</sup>·Ji-Soo Han<sup>2</sup>  
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering CO., LTD<sup>1</sup>  
Inha University<sup>2</sup>

Recent accidents of crude oil tankers have resulted in sinking, grounding of vessels and significant levels of marine pollution. Therefore, International Maritime Organization (IMO) has been strengthening the regulations of ship maneuvering performance in MSC 137. The evaluation of maneuvering performance can be made at the early design stage; it can be investigated numerically or experimentally. The main objective of this paper was to investigate the maneuvering performance of a VLCC due to the increase of rudder force at an early design stage for low speed in shallow water conditions. It was simulated in various operating condition such as deep sea, shallow water, design speed and low speed by using the numerical maneuvering simulation model, developed using MMG maneuvering motion equation and KVLC2 (SIMMAN 2008 workshop). The effect of increasing the rudder force can be evaluated by using numerical simulation of turning test and ZIG-ZAG test. The research showed that, increasing the rudder force of a VLCC was more effective on improving the turning ability than improving the course changing ability especially. The improvement of turning ability by the rudder force increasing is most effective when the ship is sailing in shallow water at low forward speed.

**Keywords** : Maneuvering(조종성능), Rudder force(타력), Shallow-water(천수), MMG model, Turning ability(선회성능), Yaw checking ability(변침성능), numerical simulation(수치 시뮬레이션)

## 1. 서론

대형 유조선의 운항 사고로 인한 원유 유출 사건, 선박의 안전 운항과 해양 오염 방지에 대한 관심 증대로 인해 국제해사기구(IMO)는 선박의 조종성능에 관한 기준을 확정하여, 1994년 7월 1일 이후에 건조되는 타와 추진기를 장치한 길이 100m 이상의 일반 선박과 선체의 길이에 관계없이 모든 화학제품운반선과 가스운반선에 이 규정을 적용하도록 권고하였다. 조종성능에 대한 기준 제정으로 초기설계단계에서부터 실선의 조종성능을 정확하게 추정하려는 움직임이 일어났고, 이는 활발한 연구로 이어졌다.

선박 조종운동 모델에 관한 대표적 연구로는 Nomoto et al.(1957)은 K-T 응답모델을 제안한 바 있으며, Abkowitz (1980)는 섭동모델(Perturbation model)을 제안한 바 있다. 또한 위 두 가지 모델의 한계를 극복하기 위해 선체, 프로펠러, 타 등의 각 요소를 구별해서 기술한 모듈형(modular type) 모델을 일본의 조

종 운동 수학 모델 검토 그룹인 MMG가 제안했다. (Kijima, et al. 1990)

다양한 운항 조건에서의 조종성능 평가에 관한 선행 연구는 중고속 천수, 저속 침수, 저속 천수에서의 조종성 추정 연구로 나눌 수 있다. 중고속 천수에 관한 대표적인 연구로는 섭동 모델에 적합한 조종성 계수의 추정식을 제안한 바 있는 Sheng (1981)과 Ankudinov (1990)의 연구가 있으며, Kijima, et al (1990)과 Kobayashi (1995)는 MMG 모델에 적합한 조종성 계수 추정식을 제안한 바 있다. 저속 침수에 관한 대표적인 연구로는 Tacashima (1986), Sohn (1992), Yoon (2005), Yeon (2005)의 연구가 있으며, Takashima와 Sohn은 저속 침수에서의 조종성 추정을 위해 Fourier 급수를 이용한 저속 침수 모델을 제안하였고, Yoon은 system identification이 용이한 모델을 제안하였다. 저속 천수에서의 조종성 추정에 관한 대표적인 연구로는 Yoshimura (1988)와 Kim (2006)의 연구가 있다. Yoshimura는 수심/흘수가 1.5/1.2일 때의 PCC선형에 대한 저속,천수에서의

조종성을 추정하였으며, 김세원은 주요제원으로 저속, 천수에서의 조종성을 추정할 수 있는 방정식을 제안하였다.

특수타와 조종성능 개선 관계에 관한 연구로는 Sohn (1997), Lee (2001)의 연구가 있다. Sohn은 타 단독 시험을 실시하여 특수타가 타 직압력에 관련된 실험 정수들에 미치는 영향에 관해 연구하였고, 타의 스펠길이 증가가 선박의 침로안정성능을 저해할 수 있다는 결론을 낸 바 있다. Lee (2001)는 플랩타와 혼타를 채택한 조종성능 관계를 연구하였고, 플랩타를 채택한 경우 선회 성능이 아주 향상되나 직진 안전성은 초기에는 혼 타보다 나쁘지만 일정 시간 후에 향상되는 것을 확인하였다.

한편 초대형 유조선(VLCC)과 같은 저속 비대선은 항만 내 운항 및 천수 운항 등의 저속 운항 상태에서 타력 감소로 인한 조종성능 저하로 인하여 안전 운항에 위협을 받고 있다. 타 면적 증대, 플랩 및 콰다 제트 등의 고 양력 발생 장치 부착 등의 다양한 방법의 타력 증가와 이로 인한 선박 조종성능 변화에 관한 연구들이 수행되었다. 이들 연구에서는 조종성능 평가는 심수영역 및 설계 선속에서 수행되어 타력 저하로 인하여 문제가 되고 있는 저속 운항 및 천수 운항의 경우에 대하여 충분히 검토되고 있지 않다.

본 논문에서는 심수(deep water), 천수(shallow water) 등의 다양한 운항 조건(operational condition)에서 타력 증가가 저속 비대선의 조종성능에 미치는 영향에 관하여 수치적으로 평가한다. 또한 본 논문에서는 조종성능 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 심수(deep water) 운항 및 천수(shallow water) 운항, 설계 선속 및 저속 운항 등의 다양한 운항 상태에서 타력 증가에 의한 선박의 선회성능(turning ability)과 변침성능(yaw checking ability) 변화를 고찰 하였다.

## 2. 선체 조종 운동

### 2.1 선체 조종운동 방정식

선체 조종운동 표현에서 좌표계는 Fig. 1과 같은 선체고정좌표를 사용하였으며 수평면내에서의 조종운동은 식(1)과 같이 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)의 3자유도로 나타내어 표현한다. 단,  $X, Y, N$ 은 선체, 프로펠러 및 타의 상호 간섭효과를 포함하고 있다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X_H + X_P + X_R \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y_H + Y_P + Y_R \\ I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N_H + N_P + N_R \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$m$  : 선체(hull)의 질량(mass),

$I_z$  : Z축 주위의 질량관성모멘트

$u, v, r$  : surge, sway, and yaw angular velocities

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$  : surge, sway, and yaw angular accelerations

$X, Y, N$  : x축, y축, z축 방향의 유체력

$H, P, R$  : 선체, 프로펠러, 타

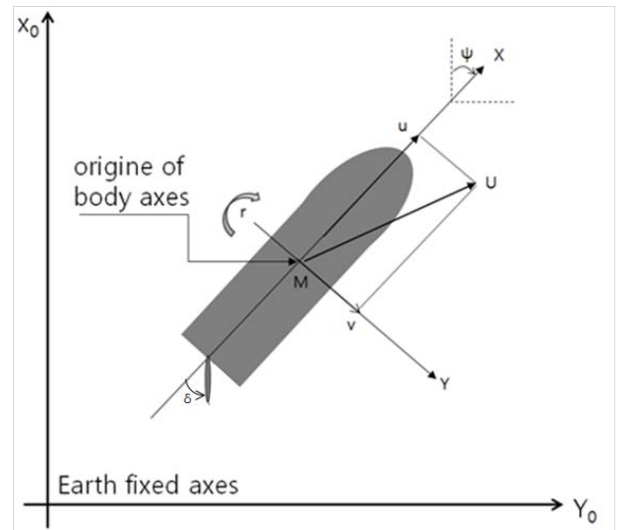


Fig. 1 Coordinate system.

### 2.2 선체에 작용하는 힘과 모멘트

MMG 조종운동 수학적모델을 이용하여 선체에 작용하는 유체력  $X, Y, N$ 을 비선형항을 포함하여 식 (3), (4), (5)과 같이 조종 유체력 미계수를 이용하여 나타낸다.

$$X_H = X_u \dot{u} + X_{vv} v^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 + X(u) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_H = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_{v|v}|v| + Y_r r + Y_{r|r}|r| \\ + Y_{vrr} vr^2 + Y_{vvr} v^2 r \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_H = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_{v|v}|v| + N_r r + N_{r|r}|r| \\ + N_{vrr} vr^2 + Y_{vvr} v^2 r \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.3 프로펠러에 작용하는 힘과 모멘트

선박이 전진하는 경우에 프로펠러에 작용하는 힘은 주로 선박의 전후방향으로만 작용하므로,  $Y_P$ 와  $N_P$ 항은 일반적으로 무시한다. 본 논문에서는 MMG 조종운동 수학적모델(MMG mathematical model)을 이용하여 프로펠러 추력을 식(6)과 같이 나타낸다.

$$X_P = (1 - t) T \quad (6)$$

$$Y_P = 0 \quad (7)$$

$$N_P = 0 \quad (8)$$

여기서

$$T = \rho n^2 D_P^4 K_T(J_P)$$

$$J_P = u_P / n D_P$$

- $t$  : 추력감소계수(Thrust deduction factor)
- $T$  : 프로펠러에 의한 추력 (propeller thrust)
- $n$  : 프로펠러의 초당 회전수 (propeller RPS)
- $D_P$  : 프로펠러 직경 (propeller diameter)
- $K_T$  : 프로펠러 추력 계수 (propeller thruster coefficients)

### 2.4 타에 작용하는 힘과 모멘트

선체(Hull)와 타의 상호 간섭에 의하여 조타 시에 선미부의 압력 증가로 인하여 선체 전체에 작용하는 저항이 감소한다. 이러한 현상을 조타에 의한 타 저항 감소로 취급하고 수정 계수  $(1 - t_R)$ 을 써서 조타에 의하여 발생하는 유체력  $X$ 를 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta \tag{9}$$

$t_R$  : 부가저항계수(Coefficients for additional drag)

$F_N$  : 타직압력(rudder normal force)

$\delta$  : 타각(rudder angle)

또한 조타(steering) 시 선체에 유기되는 힘은 타 직압력의 횡(sway)방향 성분에 거의 비례하므로 타 직압력의 횡 방향 성분의  $a_H$ 배의 힘이 선체 중앙으로부터  $x_H$ 의 위치에 작용한다고 가정하여 조타에 의하여 발생하는 유체력  $Y$  및  $N$ 을 식(10), (11)으로 표현 할 수 있다.

$$Y_R = -(1 + a_H)F_N \cos \delta \tag{10}$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \tag{11}$$

$a_H$  : 타와 선체의 간섭에 의한 좌우동요력 증가계수(effective inflow angle from rudder position)

$x_H$  : 무게중심에서 타와 선체의 간섭에 의한 좌우 동요력 작용점까지의 거리(Distance from the center of gravity to the center of rudder force)

한편 식 (9), (10), (11)에 포함된 타 직압력의 무차원 값  $F_N'$ 은 식 (12)로 구할 수 있다.

$$F_N' = (U_R^2 / U^2)(A_R / L^2) f_a \sin \alpha_R \tag{12}$$

여기서

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$$\alpha_R = \delta - \delta_R$$

$$\delta_R = \delta_0 + \gamma_R(v' + l_R' r')(U/u_R)$$

$$u_R = \epsilon u_P \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T(J_P)}{\pi J_P^2}} - 1 \right) \right\} + (1 - \eta)}$$

$$v_R = -u_R \tan \delta_R$$

$$\eta : D_P / h_R$$

$A_R$  : 타면적(rudder area)

$h_R$  : 타 높이(rudder height)

$U_R$  : 타 위치에서의 유효유속(inflow speed at rudder position)

$\alpha_R$  : 타 위치에서의 유효 유입류 각(effective angle inflow from rudder position)

$$J_P = u_P / n D_P$$

$\gamma$  : 정류계수

$$\epsilon : u_{R0} / u_P$$

$$\kappa : k_x / \epsilon$$

## 3. 조종운동 시뮬레이션 모델

### 3.1 시뮬레이션 모델

선박의 조종성능(manueverability)을 수치 시뮬레이션(mathematical simulation)을 통하여 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 MATLAB & SIMULINK를 이용하여 조종성 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

대상 선박으로는 SIMMAN 2008 워크숍(workshop)에서 MOERI, NMRI 등의 기관에서 실험과 수치 시뮬레이션(numerical simulation)을 이용하여 조종성능(manueverability) 및 조종성 유체력 미계수(manuevering hydrodynamic coefficients)를 추정하여 발표한 결과가 있는 KVLCC2를 선정하였다. 또한 KVLCC2의 MMG 조종운동 수학기호는 KRISO가 공개한 Table 1의 조종성 유체력 미계수(manuevering hydrodynamic coefficients) 및 Table 2의 상호 간섭 계수(interaction coefficients)를 이용하여 표현하였다.

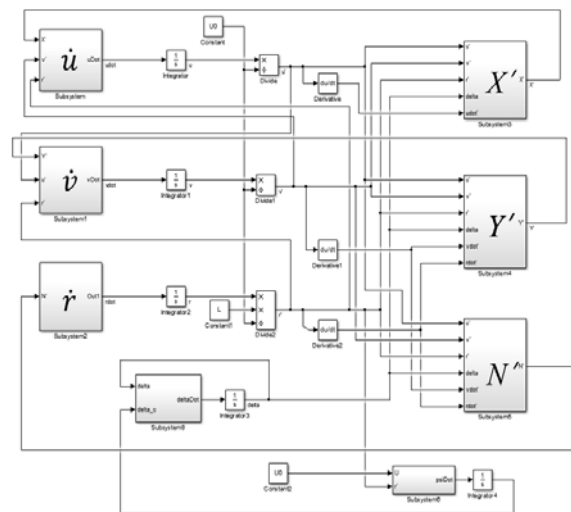


Fig. 2 Model of numerical simulation

Table 1 Hydrodynamic coefficients of KVLCC2 (Kim et al, 2008)

Coefficients	KVLCC2	Coefficients	KVLCC2
$X_u'$	-0.000954	$Y_{vrr}'$	-0.022999
$X_{vv}'$	0.001688	$Y_{rvv}'$	0.021775
$X_{rr}'$	0.001219	$N_v'$	-0.000785
$X_{vr}'$	0.013821	$N_r'$	-0.000800
$f_a$	2.1082	$N_v'$	-0.008754
$Y_v'$	-0.015104	$N_{v v}'$	0.001250
$Y_r'$	-0.001428	$N_r'$	-0.003115
$Y_r'$	-0.016190	$N_{r r}'$	0.000038
$Y_{v v}'$	-0.030441	$N_{vvr}'$	0.001063
$Y_r'$	0.004720	$N_{rvv}'$	-0.017563
$Y_{r r}'$	0.000205		

Table 2 Interaction coefficients of KVLCC2 (Kim et al, 2008)

Coefficients	KVLCC2	Coefficients	KVLCC2
$1 - t_R$	0.5677	$a_H \times x_H$	-0.0809
$a_H$	0.2723	$\epsilon$	1.3247
$x_H$	-0.2970	$\kappa$	0.4390

### 3.2 타 모델

선박에 장착되는 타 장치는 유압장치에 의하여 조작되며 실제로는 일정한 각도를 가지고 타 각도가 조정된다. 이러한 조타 장치의 조작 원리를 Fig.4과 같은 블록선도 모델링하여 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 여기서  $\delta_c$ 는 명령타각(command rudder angle),  $\delta_{max}$ 는 최대타각(maximum rudder angle)을  $\dot{\delta}_{max}$ 는 최대 타각속도,  $\delta$ 는 실제타각(actual rudder angle)을 각각 나타낸다.

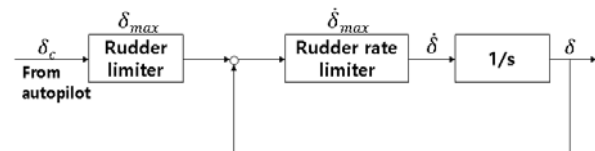


Fig. 4. Simplified diagram of the rudder control loop

### 3.3 타력 증가 모델

시뮬레이션 모델에서 타력 증가는 타의 수학적모델( $X_R$ ,  $Y_R$ ,  $N_R$ ) 중에서 타 직압력의 양력 계수(lift coefficients)를 0~80%로 증가시켜서 표현하였다. 식(13)은 타직압력을 나타낸다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R C_N U_R^2 \sin \alpha_R \quad (13)$$

여기서

$C_N$  : 타의 양력계수(Rudder lift coefficients)

$U_R$  : 타 위치에서의 유효 유속(Effective the velocity)

$\alpha_R$  : 타 위치에서의 유효 유입류각

$A_R$ : 타면적(rudder area)

## 4. 시뮬레이션 및 고찰

### 4.1 시뮬레이션 개요

타력 증가가 다양한 운항 조건(operational condition)에서 선박의 조종성능(manueverability)에 미치는 영향에 관한 정량적 평가를 위하여 다음의 세 가지 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

- 조종운동 시뮬레이션 모델 검증

- 심수(deep water)운항상태에서 타력 증가에 의한 조종성능 평가

- 천수(shallow water)운항상태에서 타력 증가에 의한 조종성능 평가

수치 시뮬레이션에서는 Runge-Kutta Gill법에 의한 수치적분법을 사용하였으며 시뮬레이션 시간, 타 조작 등의 시뮬레이션 조건은 Table 3와 같다.

시뮬레이션 케이스는 Table 4와 같다. CASE 1은 구축되어진 조종운동 수치모델의 검증을 위한 단계로 심수영역에서 설계속도(15.5knots)로 운항하면서 타력(rudder force) 증가가 없는 상태에서 Turning test와 Zig-Zag test를 수행하여 타 기관의 조종운동 수치모델과 조종성능을 비교하였다. CASE 2는 심수영역에서 타력과 선속을 변화시켜 운항하면서 Turning test와 Zig-Zag test를 수행하여 선회성능(turning ability)과 변침성능(yaw checking ability) 변화를 비교하였다. CASE 3은 천수영역에서 타력과 선속을 변화시켜 운항하면서 Turning test와 Zig-Zag test를 수행하여 선회성능(turning ability)과 변침성능(yaw checking ability) 변화를 비교하였다. 또한 CASE 3에서는 저속 운항 시의 Cross flow drag를 고려한 조종운동 수학적모델을 이용하였다.

Table 3 Condition of numerical simulation

Simulation total time	1000 sec
Rudder turn rate	2.34°/s
Action time of rudder angle command (case of Turning test)	0 sec

Table 4 Case of numerical simulation

CASE	Condition	Speed variation	Rudder force variation
1	Deep Sea	×	×
2	Deep Sea	○	○
3	Shallow water	○	○

## 4.2 시뮬레이션 모델 검증

### 4.2.1 Turning Test

대상선 KVLCC2에 대하여 타 각 35° 좌현과 우현에 대한 선회 시험 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 Table 5와 Fig. 5~6에 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 좌, 우현의 선회궤적이 차이를 보이는 것은 프로펠러가 한 쪽 방향으로만 회전하기 때문에 타에 전달되는 유효 유입각( $\alpha_R$ )에 차이가 나는 것으로 예측된다.

SIMMAN 2008 워크숍에서 발표된 타 기관의 수치 시뮬레이션 결과와 비교한 결과 구축된 조종운동 수치모델의 좌, 우현 선회 시험(starboard turning test)의 전진거리(advance)와 전술선회직경(tactical diameter) 값이 다른 기관 결과 범위 내에 들어와 있으며 평균 값 부근에 있는 것을 확인하였다.

Table 5 Results of Turning test

Indices	35° Starboard Turn	35° Port Turn
Advance	3.09L	3.17L
Tactical diameter	3.11L	2.87L

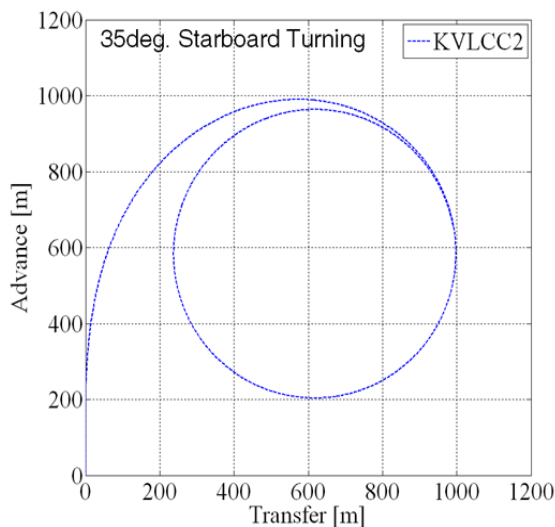


Fig. 5 Trajectories of 35° Starboard Turn

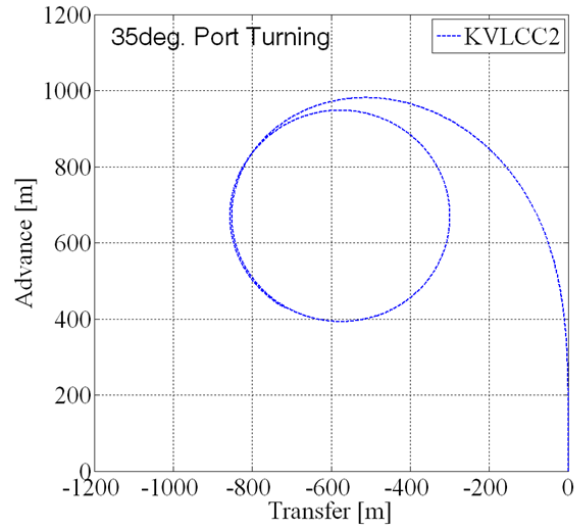


Fig. 6 Trajectories of 35° Port Turn

### 4.2.2 Zig-Zag Test

대상선 KVLCC2에 대하여 10°/10°, 20°/20° Zig-Zag Test 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 얻어진 1<sup>st</sup> overshoot angle과 2<sup>nd</sup> overshoot angle을 Table 6에 나타내며, 시간에 따른 선수각(heading angle)의 변화를 Fig. 7~8에 나타낸다.

SIMMAN 2008 워크숍에서 발표된 타 기관의 수치 시뮬레이션 결과와 비교한 결과를 구축된 조종운동 수치모델의 1st overshoot angle은 약간 작게 나오지만, 2nd overshoot angle 값이 다른 기관의 결과 범위 내에 들어와 있으며 평균 값 부근에 있는 것을 확인하였다.

Table 6 Results of Zig-Zag test

Indices	10°/10° Zig-Zag	20°/20° Zig-Zag
1 <sup>st</sup> overshoot angle	8.3°	13.4°
2 <sup>nd</sup> overshoot angle	7.1°	7.6°

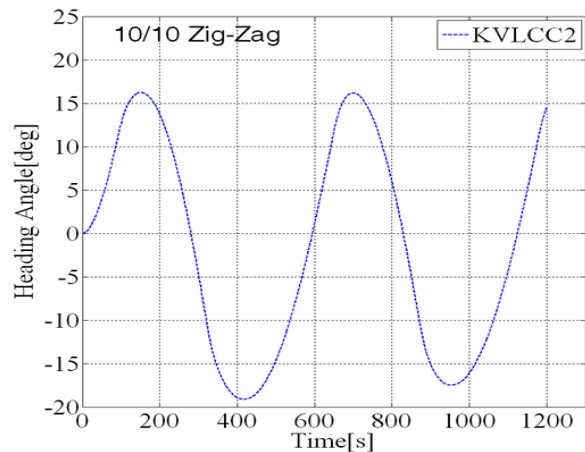


Fig. 7 Time History of Heading Angles for 10° /10° Zig-Zag Test

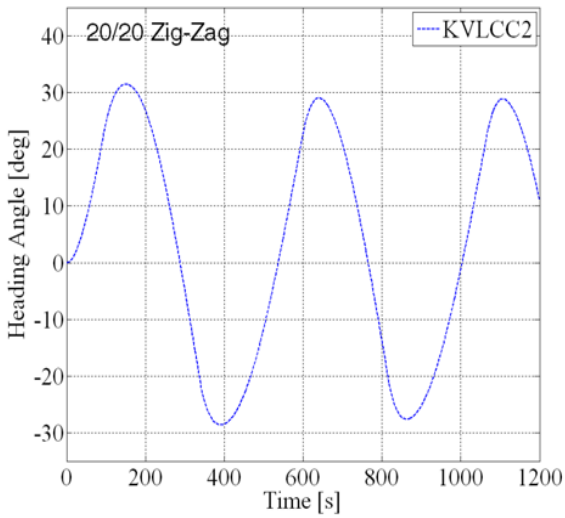


Fig. 8 Time History of Heading Angles for 20° /20° Zig-Zag Test

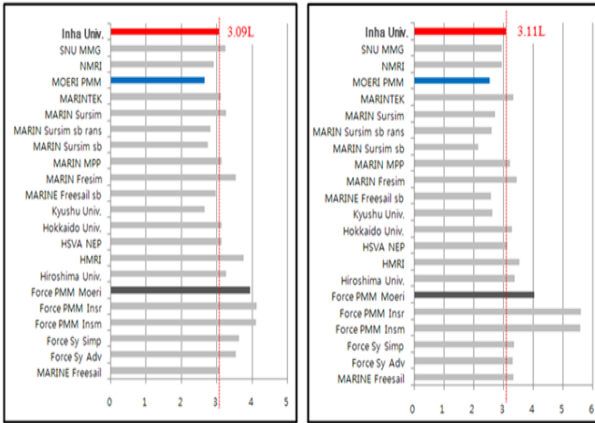


Fig. 9 Advance / Tactical diameter derived from Starboard turning test

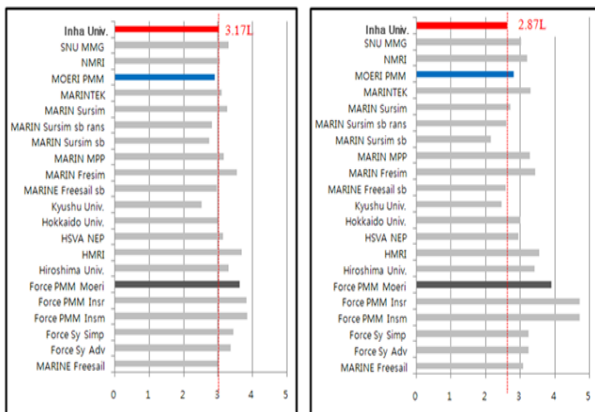


Fig. 10 Advance / Tactical diameter derived from Port turning test

### 4.2.3 고찰

본 논문에서 개발한 조종운동 수치 모델을 검증하기 위하여 Turning test와 Zig-Zag test에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과,

연어진 전진거리, 전술선회직경, 1<sup>st</sup> overshoot angle과 2<sup>nd</sup> overshoot angle 등의 조종성능 평가 지표가 타 기관의 결과와 비교하여 유효한 것으로 판단된다.

따라서, 본 논문에서는 구축한 조종운동 시뮬레이션 모델이 선박의 조종성능을 평가하는데 적합한 것으로 판단하여 타력 향상과 심수 운항, 천수 운항의 다양한 조건에서의 조종운동 평가에 활용하였다.

## 4.3 심수운항에서의 타력 향상에 따른 조종성능 평가

### 4.3.1 Turning Test

심수운항에서 조종운동 수치 모델을 이용하여 타력 증가 시의 선회성능 변화를 평가하기 위하여 우현 및 좌현 선회 시험 (starboard turning test)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 타력 증가에 의한 선회궤적의 변화를 Table 7과 8에, 전진거리와 전술 선회직경의 감소율을 Fig. 11과 12에 나타낸다.

Table 7 Reduction of advance and tactical diameter (Starboard Turn)

Starboard Turning Test of KVLCC2		
Lift	Advance	Tactical diameter
0%	3.09L ( 0% reduction)	3.11L ( 0% reduction)
20%	2.95L ( 4.53% reduction)	3.04L ( 2.25% reduction)
40%	2.84L ( 8.09% reduction)	2.97L ( 4.50% reduction)
60%	2.75L (11.00% reduction)	2.92L ( 6.11% reduction)
80%	2.68L (13.27% reduction)	2.88L ( 7.40% reduction)

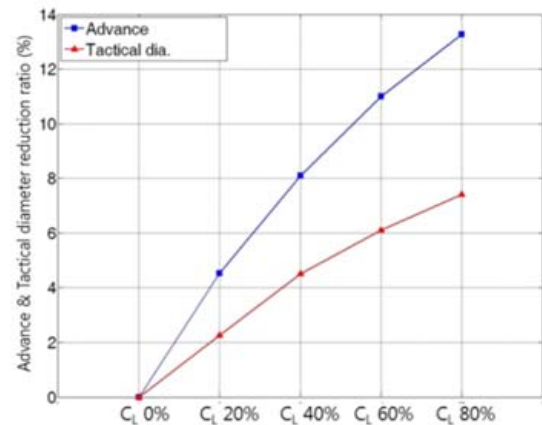


Fig. 11 Reduction of advance and tactical diameter (Starboard turn)

Table 8 . Reduction of advance and tactical diameter (port turn)

Port Turning Test of KVLCC2		
Lift	Advance	Tactical diameter
0%	3.17L ( 0% reduction)	2.87L ( 0% reduction)
20%	3.03L ( 4.42% reduction)	2.76L ( 3.83% reduction)
40%	2.92L ( 7.89% reduction)	2.67L ( 6.97% reduction)
60%	2.83L (10.73% reduction)	2.59L ( 9.76% reduction)
80%	2.75L (13.25% reduction)	2.53L (11.85% reduction)

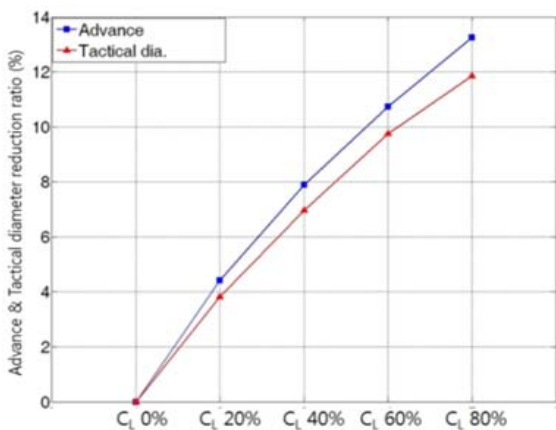


Fig. 12 Reduction of advance and tactical diameter(Port turn)

### 4.3.2 Zig-Zag Test

타력 증가 시의 변침성능 변화를 평가하기 위하여 10°/10° Zig-Zag Test 및 20°/20° Zig-Zag Test에서 대한 시뮬레이션을 수행하여 타력 증가에 의한 overshoot angle의 변화를 확인하였다. Table 9와 Fig.13는 10°/10° Zig-Zag Test의 타력 증가에 의한 overshoot angle의 값과 감소율을 나타내며 Table 10과 Fig. 14은 20°-20° Zig-Zag Test의 타력 증가에 의한 overshoot angle의 값과 감소율을 각각 나타낸다.

Table 9 1<sup>st</sup> & 2<sup>nd</sup> overshoot angle of 10° /10° Zig-Zag test by improved rudder force

10°/10° Zig-Zag Test of KVLCC2		
Lift	1 <sup>st</sup> overshoot angle	2 <sup>nd</sup> overshoot angle
0%	8.25 ( 0% reduction)	7.13 ( 0% reduction)
20%	6.58 (20.24% reduction)	5.16 (27.63% reduction)
40%	5.57 (32.48% reduction)	3.99 (44.04% reduction)
60%	4.90 (40.01% reduction)	3.24 (54.56% reduction)
80%	4.43 (46.30% reduction)	2.70 (62.13% reduction)

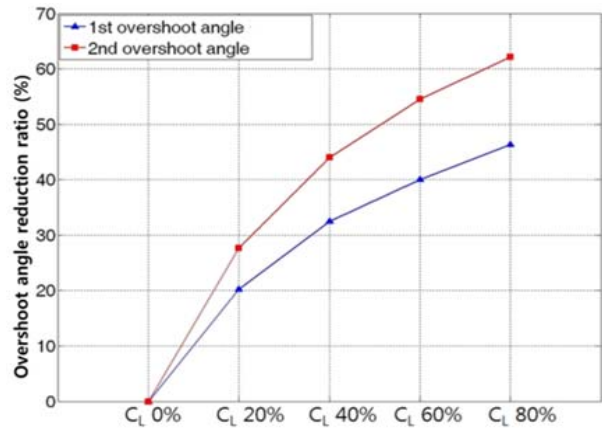


Fig. 13 Reduction of overshoot angle of 10° /10° Zig-Zag test by improved rudder force

Table 10 1<sup>st</sup> & 2<sup>nd</sup> overshoot angle of 20° /20° Zig-Zag test by improved rudder force

20°/20° Zig-Zag Test of KVLCC2		
Lift	1 <sup>st</sup> overshoot angle	2 <sup>nd</sup> overshoot angle
0%	13.39 ( 0% reduction)	7.59 ( 0% reduction)
20%	11.29 (15.68% reduction)	6.13 (18.84% reduction)
40%	9.94 (25.77% reduction)	5.21 (31.36% reduction)
60%	8.98 (32.94% reduction)	4.52 (40.45% reduction)
80%	8.23 (38.54% reduction)	4.00 (47.30% reduction)

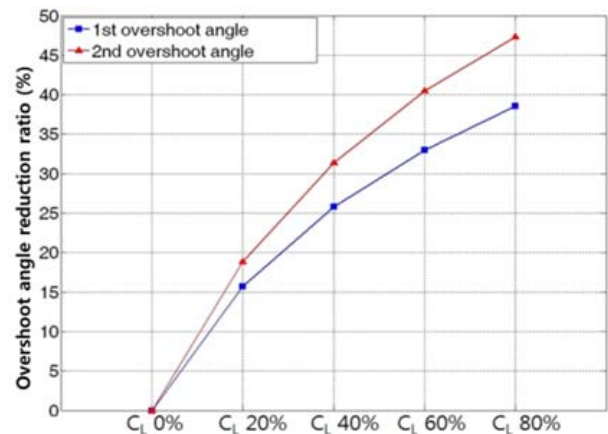


Fig. 14 Reduction of overshoot angle of 20° /20° Zig-Zag test by improved rudder force

### 4.3.3 고찰

심수운항에서 타력을 변화시켜 좌현과 우현 선회시험, 10°/10° 및 20°/20° 지그재그 시험(Zig-Zag test)에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 타력 증가로 인하여 전진거리와 전술선회직경 감소하여 선회성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 타력 증가는 전진거리를 감소시키는 데 더 효과적이었다. 또한 변침성능의 경우 역시 10°/10° 및 20°/20° 지그재그 시험에 1<sup>st</sup> overshoot angle과 2<sup>nd</sup> overshoot angle이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 타력 증가는 2<sup>nd</sup> overshoot angle을 감소시키는 데 더 효과적이었다.



### 4.4 천수운항에서의 타력 향상에 따른 조종성능 평가

#### 4.4.1 천수모델 및 Cross flow drag

천수운항 상태를 고려하기 위하여 MMG 조종운동방정식에 선체 유체력, 프로펠러 및 타에 대한 천수영향을 추가하였다. 선체 유체력에 대해서는 Hull에 관계되는 조종 유체력 계수를  $h/T$  (수심/흘수)의 함수로 고려하여식 (15)와 같이 천수 영향을 반영하였으며, 프로펠러는 MMG 조종운동방정식의 표현을 그대로 사용하고 반류계수  $w$ 에 천수 영향만을 고려하기로 하였다. 또한 타의 수학 모델은 식(9), (10), (11)의  $a_H, x_H$ 에 천수 영향을 고려하여 식 (16)과 같이 나타내었다. (Yaksukawa, 1998)

$$Y_{v\_shallow} = Y_{v\_deep} \times f_{Y_v} \left( \frac{h}{T} \right) \quad (15)$$

$$Y_{\dot{v}\_shallow} = Y_{\dot{v}\_deep} \times f_{Y_{\dot{v}}} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$N_{v\_shallow} = N_{v\_deep} \times f_{N_v} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$N_{\dot{r}\_shallow} = Y_{\dot{r}\_deep} \times f_{N_{\dot{r}}} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$Y_{r\_shallow} = Y_{r\_deep} \times f_{Y_r} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$Y_{cross\_shallow} = Y_{cross\_deep} \times f_{Y_{cross}} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$N_{r\_shallow} = N_{r\_deep} \times f_{N_r} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$N_{cross\_shallow} = N_{cross\_deep} \times f_{N_{cross}} \left( \frac{h}{T} \right)$$

$$f_{coefficient} \left( \frac{h}{T} \right) = C_1 \left( \frac{h}{T} \right)^{C_2}$$

식 (15)에 포함되어 있는 천수 영향의 계수  $C_1, C_2$ 는 Table 11과 같다. (Yoo, 2000)

Table 11 Shallow water effect coefficients

	$C_1$	$C_2$
$Y_v$	4.0216	-0.6702
$Y_r$	3.4555	-0.5869
$Y_{\dot{v}}$	1.2929	-0.1366
$Y_{cross}$	3.0372	-0.5244
$N_v$	2.5457	-0.4494
$N_r$	2.2303	-0.4055
$N_{\dot{r}}$	1.1213	-0.0622
$N_{cross}$	2.1413	-0.3356

$$a_{H\_shallow} = a_{H\_deep} \times c_1 \left( \frac{h}{T} \right)^{c_2} \quad (16)$$

$$c_1 = 2.4316, c_2 = -1.121$$

$$x_{H\_shallow} = x_{H\_deep} \times \left( c_1 \ln \left( \frac{h}{T} \right) + c_2 \right)$$

$$c_1 = 0.5063, c_2 = 0.2055$$

또한 천수에서는 설계 선속보다 낮은 저속에서 선박이 운항 되는 점을 고려하여 저속운항에 의한 선체 유체력의 변화는 cross flow model을 MMG 조종운동방정식에 추가하여 표현하였다. 저속을 고려한 선체 모델은 식(17)과 같고, 선체에 작용하는 힘과 모멘트에 포함된 cross flow drag 성분은 식 (18), (19)와 같이 계산 할 수 있다.

$$X_H = X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 \quad (17)$$

$$Y_H = Y_r r + Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} + \frac{\rho}{2} T \int_{\frac{L}{2} - \frac{L}{10}^a}^{\frac{L}{2}} C_{D1Y}(x)(v+rx)|v+rx|dx + \frac{\rho}{2} T \int_{-\frac{L}{2} + \frac{L}{10}^\beta}^{\frac{L}{2} - \frac{L}{10}^\alpha} C_{D2Y}(x)(v+rx)|v+rx|dx + \frac{\rho}{2} T \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2} - \frac{L}{10}^\beta} C_{D3Y}(x)(v+rx)|v+rx|dx$$

$$N_H = N_r r + N_v v + N_{\dot{r}} \dot{r} + \frac{\rho}{2} T \int_{\frac{L}{2} - \frac{L}{10}^a}^{\frac{L}{2}} C_{D1N}(x)(v+rx)|v+rx|dx + \frac{\rho}{2} T \int_{-\frac{L}{2} + \frac{L}{10}^\beta}^{\frac{L}{2} - \frac{L}{10}^\alpha} C_{D2N}(x)(v+rx)|v+rx|dx + \frac{\rho}{2} T \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2} - \frac{L}{10}^\beta} C_{D3N}(x)(v+rx)|v+rx|dx$$

$$Y_{cross} = \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x)|v+rx|(v+rx)dx \quad (18)$$

$$N_{cross} = \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x)|v+rx|(v+rx)x dx \quad (19)$$

여기서,  $C_D(x)$ 는 선장 방향 단면 변화에 따른 계수를 나타낸다. 선장 방향으로 분포하는 cross flow drag 계수를 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다. (Oltmann, 1984)



$$C_D = a_0 + a_7(x/l)^7 + a_8(x/l)^8 + a_9(x/l)^9 \quad (20)$$

여기서,  $x$ 는 선박 길이 방향 위치,  $l$ 은  $L/2$ 를 의미하며, cross flow drag를 정의하는 계수 값  $a_0, a_7, a_8, a_9$ 는 실험에 의해 경험적으로 구한다. 길이 방향으로 분포하는 cross flow drag 계수를 그림으로 표현하면 다음과 같다.

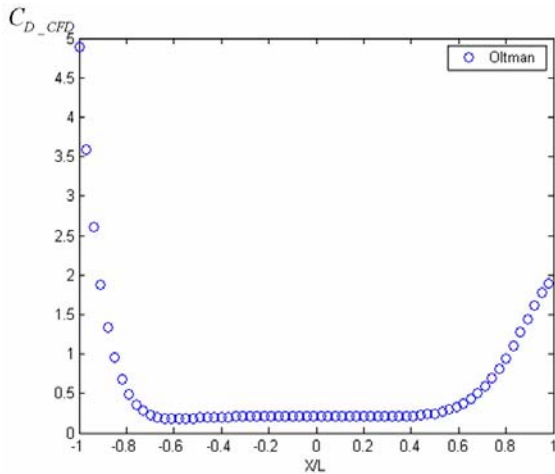


Fig. 15 cross flow drag coefficients by ship length (Oltman, 1984)

#### 4.4.2 Turning Test

Fig. 16는  $h/T=3, h/T=1.5, h/T=1.2$ ( $h$ : 수심,  $T$ : 흘수)의 영역에서 수치 시뮬레이션을 통해  $35^\circ$  우현 선회 시험을 수행한 결과를 보여 주고 있으며, Table 11에 수심에 따른 전진거리와 전술선회직경의 값을 나타내었다.  $35^\circ$  우현 선회 시험의 결과  $h/T=3$ 과  $h/T=1.2$ 에서 전진거리 차이는  $1.70L$ , 전술선회직경의 차이는  $3.47L$ 로 천수에 들어갈수록 선회궤적이 전진거리보다 선회 직경(transfer) 방향으로 크게 증가하는 것을 확인하였다.

또한 천수영역( $h/T=1.2$ )에서 선속을 설계 선속의 100%, 60%, 20%로 변화시켰을 때 타력 증가에 의한 선회 궤적의 변화를 계산하였다. 선속 변화 시 심수와 천수에서의 타력 증가에 의한 전진거리와 전술선회직경의 감소율을 Fig.17~19에 나타내었다.

Table 12 Advance and tactical diameter by depth of water

35° Starboard Turning Test of KVLCC2		
$h/T$	Advance	Tactical diameter
$h/T=3.0$	3.54L	4.22L
$h/T=1.5$	4.64L	6.59L
$h/T=1.2$	5.24L	7.69L

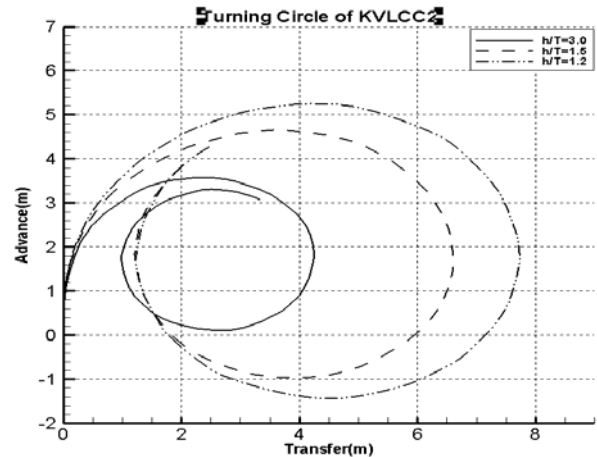


Fig. 16 35° starboard turning trajectory by water of depth

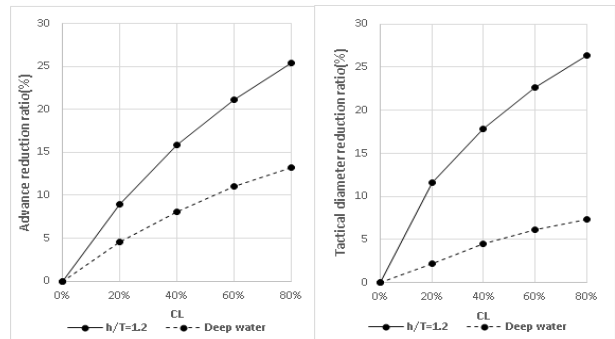


Fig. 17 Reduction of advance and tactical diameter by improved rudder force of deep & shallow water (ship speed 100%)

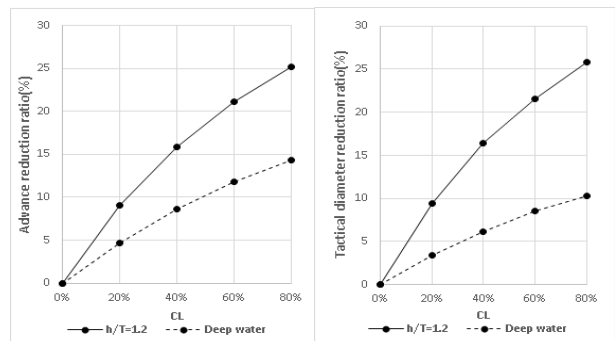


Fig. 18 Reduction of advance and tactical diameter by improved rudder force of deep & shallow water (ship speed 60%)

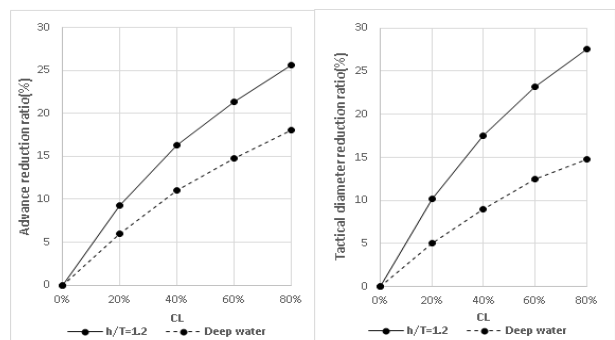


Fig. 19 Reduction of advance and tactical diameter by improved rudder force of deep & shallow water (ship speed 20%)

### 4.4.3 Zig-Zag Test

Fig. 20은  $h/T=1.5$ ,  $h/T=1.2$ 의 심수영역에서 타력 증가 시의 변침성능 변화를 평가하기 위하여  $10^\circ/10^\circ$  지그재그 시험(Zig-Zag test)에 대한 수치 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있으며, Table 13에 1<sup>st</sup> overshoot angle과 2<sup>nd</sup> overshoot angle의 값을 나타내었다.

수심의 영향을 고려한 지그재그 시험(Zig-Zag test)에 대한 수치 시뮬레이션 결과, 천수에 가까울수록 overshoot angle이 작아져 변침성능이 향상 될 것으로 예측된다. 천수 영역에서 overshoot angle이 작아지는 결과는 실선 시운전에서 천수 영역에서 침로 안정성이 향상되는 것과 일치하며, 이것은 선박의 안정성이 커질수록 overshoot angle이 줄어드는 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 지그재그 시험(Zig-Zag test)에 대한 수치 시뮬레이션 결과, 천수운항에서 심수운항에 비하여 overshoot angle이 더 작아지고 변침성능이 우수한 것으로 추정되기 때문에 타력 향상에 따른 변침성능 변화는 심수운항에 대한 평가만으로 충분할 것으로 판단된다.

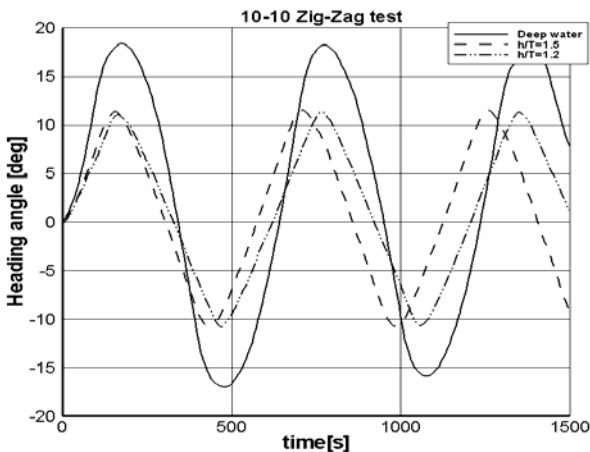


Fig. 20  $10^\circ/10^\circ$  Zig-Zag test by depth of water

Table 13 1st & 2nd overshoot angle by depth of water

10°/10° Zig-Zag Test of KVLCC2		
	1 <sup>st</sup> overshoot angle	2 <sup>nd</sup> overshoot angle
Deep water	8.25	7.13
$h/T=1.5$	1.59	0.99
$h/T=1.2$	1.22	0.76

### 4.4.4 고찰

천수운항에서 속도와 타력을 변화시켜 우현 선회시험 및  $10^\circ/10^\circ$  지그재그 시험(Zig-Zag test)에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 선회성능의 경우에는 천수에서 전진거리와

전술선회직경 감소율이 심수에 비하여 향상되는 것을 확인 할 수 있어 타력 증가로 인한 선회성능 향상은 천수에서 효과가 클 것으로 추정된다. 또한 천수에서의 overshoot angle이 심수에 비하여 작아서 천수영역에서의 선박의 변침 성능은 심수에 비하여 우수한 것으로 추정된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 심수 및 천수, 선속 변화 등의 다양한 운항 조건에서 타력 증가가 저속비대선의 조종성능에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 먼저 KVLCC2를 대상선으로 MMG 조종운동 수학적모델을 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 또한 Turning test 및 Zig-Zag test에 대한 시뮬레이션을 수행하여 타 기관의 결과와 비교하여 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 그리고 다양한 운항조건에서 타력 증가에 의한 선회성능 및 변침성능의 변화를 Turning test 및 Zig-Zag test에 대한 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 평가하였다.

본 논문에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 타력 증가는 선박의 선회성능 및 변침성능을 동시에 향상시켰으며, 선회성능 평가 지표 감소에 비해 변침성능 평가 지표 감소가 크게 나타났다. 또한 타력 증가는  $10^\circ/10^\circ$  지그재그 시험의 2nd overshoot angle 저감에 가장 효과적인 것으로 판단된다.
- 타력 증가에 따른 선회성능 향상은 심수보다 천수에서 더 효과적이며 천수 중을 저속에서 운항할 때 타력 증가에 의한 선회성능 향상이 가장 효과적이다.

본 논문에서 얻어진 다양한 운항 조건에서의 타력 향상에 의한 선박의 조종성능 평가 결과를 활용하여 향후 선박의 용도와 운항 조건에 적합한 고 양력 타 장치의 개발과 조종성능 확보를 위한 연구에 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

## 후기

본 연구는 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (NRF-2013R1A1A2005770)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

## References

- Abkowitz M.A., 1980, Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvring Trials by System Identification, *SNAME Transactions*, Vol.99
- Ankudinov, K., 1990, Manoeuvring performance of tug/barge assemblies in restricted waterways, *Proceedings MARSIM & ICSM 90*, Tokyo
- Katsuro Kijima., et, al, 1990, On the Manoeuvring Performance of a Ship with the Parameter of Loading Conditions, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 168, pp. 141-148

Kijima, K., et al., 1990, Prediction methods of ship manoeuvrability in deep and shallow water, *Proceedings MARSIM & ICSM 90*, Tokyo

Kim, S.W., 2006, *On the mathematical model of a manoeuvring ship with a slow forward speed in shallow waters*, Seoul National University, Master's Thesis

Kobayashi, E., 1995, The development of practical simulation system to evaluate ship maneuverability in shallow water, *PRADS*, Seoul

Lee, H.Y., et al., 2001, Maneuvering Performance of a Ship with Flap Rudder, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 4(1), pp 70–74.

Nomoto K., et. al., 1957, On the Steering Qualities of Ships, *International Shipbuilding Progress*, 4(35).

Sheng, Z., 1981, Contribution to the discussion of the manoeuvrability committee report, *16th ITTC Proceedings*.

Sohn, K., H., 1992, Hydrodynamic Forces and Maneuvering Characteristics of Ships at Low Advance Speed, *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 29(3), pp 90–101.

Sohn, K.H. Lee, K.W., et. al., 1997, A Study on the Effect of Rudder Area with Reference to Changes in Span Distance on Course Stability of a Ship, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 3(16), pp 1–14.

Takashina, J., 1986, Ship Maneuvering Motion due to Tugboats and Its Mathematical Model, *J.S.N.A. Japan*

Yasukawa, 1988, Computation of effective rudder forces of a ship in shallow water, *MAN 98*, France.

Oltmann, P., 1984, Simulation of combined engine and rudder maneuvers using and improved of hull-propeller-rudder interactions, *15th Symposium on Naval Hydrodynamics*.

Yasukawa, 1988, Computation of effective rudder forces of a ship in shallow water, *MAN 98*, France.

Yeun, S.M., 2005, *Optimal input design for the identification of low-speed manoeuvring equations of motion*, Seoul National University, master's thesis.

Yoo, Y.J., 2000, *An experimental research on the maneuvering derivatives of a twin screw ferry for berthing and unberthing*, Seoul National University, Doctor's Thesis.

Yoon., H., G., 2005, A Study on the Model Test Scheme for Establishing the Mathematical Model, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp. 98–104.

Yoshimura, Y., 1988, Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water—Mathematical Model at Slow forward Speed, *Journal of Kansai Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 210, pp. 77–84

Kim, S.Y, Kim, Y.G, 2008, Prediction of maneuvering performance for KVLCC1 & KVLCC2 based on PMM data, *Simman 2008*, pp. E22



김 현 준



김 상 현



김 동 영



김 인 태



한 지 수