KCS 선형의 4자유도 조종성능 추정

김연규^{1,†} · 여동진¹ · 손남선¹ · 김선영¹ · 윤근항¹ · 오병익¹
한국해양연구원 해양시스템안전연구소¹

Prediction of Maneuverability of KCS with 4 Degrees of Freedom

Yeon-Gyu Kim^{1,†} · Dong-Jin Yeo¹ · Nam-Sun Son¹ · Sun-Young Kim¹ · Kun-Hang Yun¹ · Byeong-Ik Oh¹
KORDI Maritime & Ocean Engineering Research Institute¹

Abstract

This paper presents the results of prediction of maneuverability of KCS about 4 degree of freedom(DOF) including roll motion. The prediction is carried out by CPMC captive model test. The CPMC(Computerized Planar Motion Carriage) with captive model test equipment including roll moment gage is installed at Ocean Engineering Tank of MOERI. KCS is the container ship open to the world by MOERI. To predict the 4 DOF maneuverability of a ship some tests with roll angle are conducted. And the prediction results of maneuverability by simulation are compared with the results of free running model test. The simulation results agree well with those of free running model tests.

Keywords : CPMC(CPMC), KCS(KCS), Captive model test of 4 DOF(4자유도 구속모형시험), Prediction of maneuverability(조종성능 추정), Free running model test(자유항주시험)

1. 서 론

한국해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI)는 VLCC 선형인 KVLCC1과 KVLCC2 선박과 컨테이너선인 KCS의 선형자료와 시험결과를 공개한 바 있으며, 이러한 자료를 이용하여 KVLCC1, KVLCC2 및 KCS 선형에 대한 CFD 워크숍(CFD Workshop TOKYO 2005, 5th Osaka Colloquium)이 개최되어 많은 논문이 발표된 바 있다(Kim, et al., 2005(1)). 또한 KVLCC1, KVLCC2 및 KCS 선형에 대한 조종성능 추정용 시험결과를 공개하여 발표하고 토론하는 워크숍(SIMMAN2008)이 개최된 바 있으며, 국내에서도 KVLCC 선형과 KCS 선형에 대한 연구가 많이 수행되었다(Kim & Kim, 2001; Kim, et al., 2005(2)).

CFD 해석결과 이외에도 조종시험에 의한 KVLCC 선형과 KCS 선형에 대한 연구는 많이 수행되고 있으며, 특히 해양공학수조에 서의 구속모형시험에 의하여 조종성능을 추정하는 시험이 수행되었다(Shin, et al., 2009; Kim, et al., 2009).

본 논문에서는, KCS 선형에 대하여 MOERI의 해양공학수조에 설치되어 있는 대형제어형 예인전차 CPMC(Computerized Planar Motion Carriage)를 이용하여 수행된 구속모형시험결과를 이용하여 조종운동을 시뮬레이션한 결과를 정리하였다. 본 저자의 이전 논문에서는 횡동요가 없는 3자유도에 대한 시뮬레이션 결과를 일본의 NMRI(National Maritime Research Institute)에서 수행한 CPMC 구속모형시험결과를 이용하여 추정한 조종성능결과와

독일의 SVA(Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH)와 불가리아의 BSHC(Bulgarian Ship Hydrodynamic Centre)에서 수행한 자유항주시험결과와 비교하였다(Kim, et al., 2009). 하지만 본 논문에서는 횡메타센터 높이(GM_T)가 작은 컨테이너선에서 크게 발생하는 횡동요 운동을 포함하여 조종운동을 시뮬레이션하였다. 이러한 횡동요 운동은 선박의 조종성능에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim, et al., 2003). 횡동요가 포함된 조종성능 추정을 위하여 구속모형시험에서 횡동요 모멘트를 계속하였고, 횡경사각이 있는 상태에 대한 구속모형시험을 수행하였다. 구속모형시험은 모형선에 선체길이(x) 방향으로 힘이 작용하지 않는 모형선 자항점에서 수행되었으며, 조종성능 추정 결과는 3자유도 추정결과와 MOERI에서 수행된 자유항주시험결과와 비교하였다.

2. 모형선 및 구속모형시험장치

KCS 선형의 제원은 Table 1에 정리되어 있다. 시험속도는 실선의 24.0 Kts에 해당하는 1.522 m/s에 대해서 수행되었다. Fig. 1에는 시험에 사용된 모형선의 사진이 나타나 있다.

CPMC 구속모형시험장치에 대한 자세한 내용은 Kim, et al.(2006)에 나타나 있으며, Fig. 2에는 구속모형시험장치의 사진이 나타나 있다.

Table 1 Principal dimensions of KCS

Dimensions	Real Ship	Model Ship
Scale Ratio	1.0	65.833
Lpp (m)	230.0	3.4937
B (m)	32.2	0.4891
D (m)	19.0	0.2886
T (m)	10.8	0.1641
Displace. (m ³)	52030	0.1824
AT (m ²)	54.45	0.01256
DP (m)	7.9	0.12
P/DP (0.7R)	0.8	0.8
KG (m)	14.34	0.2178
GMT (m)	0.60	0.00918
U (m/s)	24.0 Kts	1.522

Fig. 1 Model ship of MOERI

Fig. 2 Captive model test equipment

3. 구속모형시험 및 해석결과

3.1 수확모형(Kim, et al. 2007)

선체 고정 좌표에서의 횡동요를 포함한 4자유도 연성 운동방정식은 Fig. 3의 좌표계 하에서 다음과 같다.

Fig. 3 Coordinates system

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - rv - x_G \dot{\phi}^2 + z_G \dot{p}^2) &= X_H + X_P + X_R \\
 m(\dot{v} + ru - z_G \dot{\phi}^2 + x_G \dot{p}^2) &= Y_H + Y_P + Y_R \\
 I_{XX} \dot{p} - m z_G (\dot{v} + ru) &= K_H + K_P + K_R \\
 I_{ZZ} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ru) &= N_H + N_P + N_R
 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 아래첨자 H, P, R 는 각각 선체, 프로펠러, 타에 의한 유체력을 나타내고, 위 첨자 $\cdot$ 와 아래첨자 G 는 각기 시간에 대한 미분과 무게중심의 위치를 의미하며, u, v, r, p 는 각각 전진방향, 횡방향, 선수요방향, 횡동요방향 속도를 나타낸다.

3.1.1 선체에 작용하는 힘과 모멘트

$$\begin{aligned}
 X_H &= X_u \dot{u} + X_{vr} vr + X(u) + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 \\
 Y_H &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_\phi \phi \\
 &\quad + Y_{|v|} |v| + Y_{|r|} |r| + Y_{|\phi|} |\phi| + Y_{vrr} vrr \\
 &\quad + Y_{vvr} vvr + Y_{v|\phi|} v|\phi| + Y_{r|\phi|} r|\phi| + Y_{\phi vv} \phi vv + Y_{\phi rr} \phi rr \\
 K_H &= K_p \dot{p} + K_v \dot{v} + K_r \dot{r} + K_p p + K_\phi \phi - W GM_T \phi \\
 &\quad + (Y_v v + Y_{|v|} |v|)(z_Y)_v + (Y_r r + Y_{|r|} |r|)(z_Y)_r \\
 N_H &= N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\phi \phi + N_{|v|} |v| \\
 &\quad + N_{|r|} |r| + N_{vrr} vrr + N_{vvr} vvr + N_{v|\phi|} v|\phi| \\
 &\quad + N_{r|\phi|} r|\phi| + N_{\phi vv} \phi vv + N_{\phi rr} \phi rr
 \end{aligned} \quad (2)$$

$X(u)$: 직진시 선체 저항

$(z_Y)_v, (z_Y)_r$: 사향 및 선회시 선체에 대한 수평 방향 힘 작용점의 z 좌표 값

W : 선체 중량(mg)

GM_T : 횡메타센타 높이

3.1.2 프로펠러에 의한 유체 동력학적 힘

$$\begin{aligned}
 X_P &= (1-t) T \\
 T &= \rho n^2 D_P^4 K_T(J_P) \\
 J_P &= \frac{u_P}{n D_P} \\
 u_P &= (1-w_P) U \\
 w_P &= w_{P0} \exp(-C_P v_P^2) \\
 v_P &= v + x_P r
 \end{aligned} \quad (3)$$

t : 추력감소계수

x_P : 프로펠러 위치의 x 좌표

3.1.3 타에 의한 유체력

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1-t_R) F_N \sin \delta \\
 Y_R &= (1+a_H) F_N \cos \delta \\
 K_R &= -(1+a_H) z_R F_N \cos \delta \\
 N_R &= (x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \\
 F_N &= \frac{1}{2} \rho u_R^2 A_R f_\alpha \sin \alpha_R \\
 u_R &= \epsilon u_p \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_P^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \\
 \eta &= \frac{D_P}{H_R} \\
 \alpha_R &= (\delta - \delta_0) - \gamma_R (v' + l_R r') \left(\frac{U}{u_R} \right) \\
 l_R &\approx 2 x_R
 \end{aligned} \quad (4)$$

$(1-t_R)$: 타에 의하여 생기는 저항감소

F_N : 타 직압력

a_H, x_H : 타에 의하여 선체에 작용하는 간섭효과

x_R : 타 위치의 x 좌표

z_R : 타의 압력 중심의 z 좌표

f_α : 타 직압력 계수

D_P, H_R : 프로펠러 직경과 타의 높이

3.2 구속모형시험

KCS 선형에 대한 구속모형 시험조건은 Table 2에 정리되어 있다. 3자유도 조종성능 해석을 위한 시험이외에 횡동요 운동을 포함한 해석을 위하여 별도의 시험이 수행되었다. 3자유도 구속 모형시험에서도 횡동요 모멘트를 계측하여 횡동요 운동 해석에 사용하였다. Fig. 4에는 구속모형시험 중인 사진이 나타나 있다.

시험은 1.522m/s에서 수행되었으며, 모형선 자항점에 해당하는 프로펠러 rps는 15.8이었다. 그리고 부가질량계수를 구하기 위하여 동적시험이 수행되었다.

Table 2 Test conditions

Test Item	Test Condition
Resistance	$U = 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.522, 1.6$ m/sec
Self Propulsion	rps = 15.0, 13.0, 17.0, 16.0, 15.8
Static Rudder	$\delta = 0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ$
Rudder & Drift & Turning	$\beta = 0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 6^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ$ $r' = \pm 0.15, \pm 0.3, \pm 0.5$ $\delta : 3 \sim 4$ Rudder Angles
Static Drift	$\beta = 0^\circ, \pm 2^\circ, \pm 4^\circ, \pm 6^\circ, \pm 8^\circ, \pm 12^\circ, \pm 16^\circ, \pm 20^\circ$
Turning	$r' = \pm 0.15, \pm 0.2, \pm 0.3, \pm 0.4, \pm 0.5, \pm 0.6, \pm 0.7$
Drift & Turning	$\beta = 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$ $r' = \pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.6$
Pure Sway	$\dot{v}' = -0.08, -0.12, -0.16$
Pure Yaw	$\dot{r}' = -0.12, -0.24, -0.36, -0.48$
Static Heel	$\phi = 2.670, 3.446, -4.075$
Drift & Heel	$\phi = 2.670, 3.446, -4.075$ $\beta = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$
Turning & Heel	$\phi = 2.670, 3.446, -4.075$ $r' = \pm 0.2, \pm 0.4$
Free Roll Decay	$U = 0.0, 0.5073, 1.0147, 1.5220$ m/sec

Fig. 4 Photograph of CPMC captive model test

3.3 해석결과

구속모형 시험결과를 수학모형의 조종유체력 계수들을 구하기 위하여 해석하였다. 계측된 힘과 모멘트는 다음 식과 같이 무차원화하였다.

$$Force' = \frac{Force}{0.5\rho U^2 L^2}, \quad Moment' = \frac{Moment}{0.5\rho U^2 L^3} \quad (5)$$

Fig. 5에는 타각시험에서 계측된 횡동요 모멘트를 해석한 그림이 나타나 있고, Fig. 6에는 사향시험에서 계측된 횡동요 모멘트를 해석한 그림이 나타나 있다. Fig. 5의 결과로부터 z_R 이 구해지고, Fig. 6의 결과로부터 $(z_Y)_v$ 가 구해진다. Fig. 7에는 선회시험에서 계측된 횡동요 모멘트를 해석한 그림이 나타나 있고, 이 결과로부터 $(z_Y)_r$ 이 구해진다. Fig. 8에는 횡경사시험에서 계측된 횡동요 모멘트에 대한 해석결과가 실려 있고, Figs. 9와 10에는 횡경사가 있는 상태에 대해서 사향시험과 선회시험을 수행한 결과가 실려 있다. Fig. 11에는 자유감쇠시험의 시험결과가 나타나 있다. 자유감쇠시험결과로부터 K_p 를 다음과 같이 구할 수 있다(Beck, et al., 1989).

$$K_p = \frac{4k_d}{T} (I_x - K_p) \quad (6)$$

이러한 해석에 의하여 구해진 횡동요 운동 관련 조종유체력 계수들이 Table 3에 정리되어 있다. 길이에 대한 무차원화는 L_{PP} 로 하였다. z_R , $(z_Y)_v$ 와 $(z_Y)_r$ 을 수면으로부터 흡수에 대한 거리로 나타내면 0.397T, 0.458T 및 0.115T이다. 이 결과로부터 선회시험에서는 횡방향 힘의 작용점이 수면 근처에 있는 것으로 해석되었다. 물론 횡방향 힘뿐만 아니라 상하방향 힘도 횡동요 모멘트에 영향을 미치므로 복합적으로 검토가 되어야 한다.

Table 3 Maneuvering coefficients related to roll motion

Coefficients	Value	Coefficients	Value
Y_{ϕ}'	-0.000650	N_{ϕ}'	-0.000246
$Y_{v \phi}'$	0.001330	$N_{v \phi}'$	-0.000377
$Y_{\phi vv}'$	-0.15505	$N_{\phi vv}'$	-0.031590
$Y_{r \phi}'$	-0.030511	$N_{r \phi}'$	-0.004124
$Y_{\phi rr}'$	0.005536	$N_{\phi rr}'$	-0.000696
K_v'	0.000061	K_r'	0.0000189
K_{ϕ}'	-0.000174		
$(z_Y)_v'$	0.0369	$(z_Y)_r'$	0.0208
z_R'	0.0340

Fig. 5 Analysis of roll moment at static rudder test (H+P)

Fig. 6 Analysis of roll moment at static drift test (H+P)

Fig. 7 Analysis of roll moment at turning test (H+P)

Fig. 8 Analysis of roll moment at static heel test (H+P)

Fig. 9 Analysis of drift with heel test

Fig. 10 Analysis of turning with heel test

Fig. 11 Analysis of free roll decay test

4. 시뮬레이션 결과

시험해석에 의하여 구한 조종유체력계수들을 이용하여 KCS 선형에 대한 4자유도 조종 시뮬레이션을 수행하였다. 단 K_p 은 경험식을 사용하였고($K_p' = -0.193I_{xx}'$), Y_p 와 N_p 는 조종운동 중에는 그 영향이 작다고 판단되어 0으로 하였다.

Figs. 12~15에는 본 연구에서 수행된 4자유도 시뮬레이션 결과와 기존의 3자유도 시뮬레이션 결과 및 자유항주시험결과가 실려 있다. 자유항주시험은 구축모형시험에 사용된 모형선을 이용하여 수행되었으며, 모형선 자항점에서 수행되었고, KG와 GM_T 를 맞추어서 MOERI의 해양공학수조에서 수행되었다. 자유항주시험의 모형선 자항점은 17.8 rps로서 구축모형시험의 rps보다 약간 크다. 자유항주시험에 대한 자세한 내용은 Son, et al.(2010)에 나타나 있다.

Figs. 12와 13에는 타각 35도에 대한 우현 및 좌현 선회 시험 결과가 실려 있다. 선회 시험의 경우 4자유도 시뮬레이션 결과가 3자유도 시뮬레이션 결과보다 선회반경이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 자유항주시험결과는 시뮬레이션 결과보다 작은 선회반경을 보여주고 있다. 이러한 현상은 모형선 자항점의 rps 차이에 의한 타 제어력의 차이에 의해서도 발생할 수 있으며, 또한 선회 초기에서의 선수요 각속도의 크기가 작게 시뮬레이션된 것에 의한 영향에 의해서도 나타날 수도 있다. 시뮬레이션에서 횡동요 운동은 우현 선회의 경우 자유항주시험에서 예측된 횡동요보다 작게 추정되었지만, 좌현 선회에서는 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 좌우 비대칭 현상 및 선회반경 불일치에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

Figs. 14와 15에는 지그재그시험에 대해서 시뮬레이션한 결과와 자유항주시험 결과가 비교되어 있다. 그림으로부터 4자유도 시뮬레이션 결과는 1st Overshoot Angle이 자유항주시험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 3자유도 시뮬레이션보다는 지그재그성능이 나빠진 것을 알 수 있다. 일반적으로 횡동요 운동이 발생할 경우 선회성능은 좋아지고, 변침성능은 나빠진다고 알려져 있으며(Kim, et al. 2003), 본 시뮬레이션 결과에서도 그러한 특성이 잘 보이고 있다.

Fig. 12 Simulation results of 35° starboard rudder turning test

Fig. 13 Simulation results of 35° port rudder turning test

Fig. 14 Simulation results of 10°/10° zig-zag test

Fig. 15 Simulation results of 20°/20° zig-zag test

Table 4에는 추정된 조종성능 지수들을 정리하여 나타내었다. 4자유도 조종성능 지수, 3자유도 조종성능 지수가 자유항주시험결과와 같이 정리되어 있다. 자유항주시험결과는 MOERI에서 수행한 결과와 독일의 SVA(Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH)와 불가리아의 BSHC(Bulgarian Ship Hydrodynamic Centre)에서 수행한 자유항주시험결과(SIMMAN2008)가 실려 있다. SVA와 BSHC에서 사용한 모형선의 크기는 4.37m이었다. 단, 지그재그 시험결과는 좌현과 우현의 결과에 대한 평균값을 정리한 것이다. 선회시험의 경우 시뮬레이터 결과가 전반적으로 크게 추정하고 있으며, 지그재그시험의 경우 4자유도 시뮬레이션 결과가 1st Overshoot Angle은 자유항주시험결과와 매우 잘 일치하지만 2nd Overshoot Angle은 작게 추정하고 있다. 이러한 특성으로부터 선체에 작용하는 비선형 특성이 비교적 크게 나타나는 선회시험과 2nd Overshoot Angle의 추정에 영향을 주는 비선형계수들에 대한 검토가 필요하다고 생각된다.

Table 4 Maneuverability indices

	3DOF	4DOF	MOERI	SVA	BSHC
35° Turn					
Advance	3.01L	3.07L	3.01L	-	-
Tac. Dia.	3.19L	3.00L	2.64L		
-35° Turn					
Advance	2.86L	2.93L	3.06L	-	2.78L
Tac. Dia.	2.94L	2.82L	2.65L		2.72L
10°/10° ZigZag					
1st OSA	11.31°	13.55°	12.23°	11.0°	10.8°
2nd OSA	10.78°	15.67°	22.08°	18.6°	21.0°
20°/20° ZigZag					
1st OSA	16.95°	20.11°	23.54°	17.8°	19.0°
2nd OSA	14.99°	15.91°	24.40°	19.9°	22.0°

5. 결 론

한국해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI)에서 공개한 KCS 선형에 대하여 CPMC 4자유도 구축모형시험을 수행하여 조종성능을 추정하였다. 그리고 그 추정결과를 기존의 3자유도 추정결과, MOERI에서 수행한 자유항주시험결과 및 SVA, BSHC의 자유항주시험결과와 비교하였다. 추정결과는 잘 일치하는 부분도 있지만, 서로 약간의 차이를 보여주고 있는 것을 알 수 있었다.

- 선회성능은 3자유도 추정보다 4자유도 추정이 자유항주시험결과에 더 근접하고 있다.
- 변침성능은 자유항주시험결과와 1st Overshoot Angle에서 잘 일치하고 있다.
- 비선형성이 큰 선회시험과 2nd Overshoot Angle의 추정정도를 높이기 위한 노력이 필요하다.

후 기

본 논문은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 기본과제로 수행한 “선박의 자유항주 시뮬레이션 및 검증용 계측시스템 개발” 과제에 대한 연구결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- Beck, R.F. et al., 1989. *Principles of Naval Architecture*. Vol. III, SNAME, pp.79–83.
- Kim, J. Park, I.R. & Van, S.H., 2005(1). RANS Computations for KRISO Container Ship and VLCC Tanker using the WAVIS Code. *Proceeding of CFD Workshop Tokyo 2005*, pp.542–547.
- Kim, J. Park, I.R. Kim, K.S. & Van, S.H., 2005(2). RANS Simulations for KRISO Container Ship and VLCC Tanker. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp.592–600.
- Kim, S.Y. & Kim, Y.G., 2001. Computation of Viscous Flows around a Ship with a Drift Angle and the Effects of Stern Hull Form on the Hydrodynamic Forces. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), pp.1–13.
- Kim, S.Y. et al., 2003. Maneuvering Characteristics of a Large Container Ship. *Proceeding of MARSIM'03*, 3, pp.RC-8-1 – RC-8-11.
- Kim, Y.G. et al., 2006. Captive Model Test Using CPMC. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.670–676.
- Kim, Y.G. Kim, S.Y. Yang, Y.H. & Son, N.S., 2007. 4-DOF Captive Model Test Using CPMC. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.924–930.
- Kim, Y.G. et al., 2009. Prediction of Maneuverability of KCS by CPMC Captive Model Test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.553–561.
- Shin, H.K. Yoon, J.H. & Lee, H.Y., 2009. Prediction of Ship Maneuverability by Circular Motion Test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.259–267.
- Son, N.S. Kim, S.Y. Kim, Y.G. & Oh, B.E., 2010. On the Propulsion Support System for Free Running Model Test in the Propulsion Point of Real Ship. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.2035–2043.

김 연 규

여 동 진

손 남 선

김 선 영

윤 근 항

오 병 익