



1/42.0 KCS 모형선의 조종성능에 관한 연구

윤근항^{1,†} · 김동진¹ · 연성모¹ · 김유철¹ · 김연규¹ · 양경규²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
충남대학교 자율운항시스템공학과²

A Study on the Manoeuvrability of 1/42.0 Scaled KCS

Kunhang Yun^{1,†} · Dong Jin Kim¹ · SeongMo Yeon¹ · Yoo-Chul Kim¹ · Yeon Gyu Kim¹ · Kyung-Kyu Yang²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering¹
Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The emergence of new concept ships, such as autonomous ships, has drawn much attention on the manoeuvrability of ships because of the safe navigation and operation of ships. Although the manoeuvrability of KRISO Container Ship(KCS) has been frequently reported, there have been few documents of representative manoeuvre cases conducted in various methods by one institute. This paper presents the manoeuvrability of the ship in 1/42.0 model scale by 3 methods: free running model tests, horizontal planar motion mechanism tests, and computational fluid dynamics analysis. KRISO reports KCS manoeuvre data: 35° turning circle tests and 20/20(10/10) zigzag manoeuvring tests. In addition, a simple formula for integrating and comparing manoeuvre indices, Manoeuvrability Comparing Simple Index(MCSI), is proposed.

Keywords : KCS(KRISO 컨테이너선), Manoeuvrability(조종성능), Free Running Model Test(FRMT, 자유항주모형시험), Horizontal Planar Motion Mechanism Test(HPMMT, 수평면운동장치시험), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학)

1. 서론

자율운항선박, 디지털트윈 기술 등 신개념 선박, 신기술의 등장에 따라 정도 높은 선박 운항성능 추정기술이 활용 측면에서 중요해지고 있다. 선박 운항모델의 고정도화는 선박의 동적특성을 수학적으로 기술하여 실선박의 움직임을 정확하게 예측하는 것을 목적으로 한다. 고정도 운항모델은 자율운항선박의 무인운항 신뢰성 향상을 위하여 충돌회피 성능검증, 운항상태 추정, 이접안 제어기술 등에 활용되고 있으며 (KBS, 2022; Kim et al., 2018a), 실시간 정보 융합을 통하여 선박의 실시간 감시관리 및 미래 유지정비, 의사결정 보조, 효율 개선 등에도 활용이 가능하다(Assani et al., 2022).

한편 선박의 운항성능은 운항효율 향상을 위한 저항추진성능 외 전통적으로 조종성능 추정을 통하여 그 동적특성을 모사하게 되는데, 주로 모형시험(구속모형시험, 자유항주모형시험)과 전산유체해석을 통하여 선박의 초기 선형설계 단계에서 추정된다(Sung and Park, 2015). 또한 모형선 혹은 운항 중인 실선박의 시운전, 운항 정보로부터 선박의 조종성능을 추정하기 위한 연구

도 최근 활발히 진행되고 있다 (Kim et al., 2022; Park and Lee, 2020; You, 2019).

일반적으로 선박의 조종성능은 선형 결정 이후 다양한 추정방법 중 하나의 방법만으로만 진행되는데, 주로 일회성 실험의 형태로 수행된다. 따라서 주어진 선형에 대한 다양한 추정 결과의 생성 및 상호비교가 어렵고, 시험 및 해석방법에 따라 그 결과의 차이 또한 존재한다. 이에 따라 유관기관들은 SIMMAN 워크샵 등을 통하여 동일한 선형에 대한 기관별 실험 및 추정방법의 차이, 그에 따른 오차 등을 상호 비교연구하고 있다 (SIMMAN, 2020). 하지만 SIMMAN 워크샵에서의 다양한 비교항목 중 각 항목별 벤치마크용 결과는 하나의 기관에서만 대표로 제시하고 있으므로, 항목별 교차 비교는 연구수행 기관이 다르다는 제약사항도 여전히 존재한다.

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소에서 여러차례 수행한 선박의 조종성능 해석 결과 중 그 대표성과 일관성을 갖는 사례로 1/42.0 축척비의 KCS 선형을 이용한 실험 및 전산유체해석 결과를 공개하였다. 또한 조종성능과 관련된 실험 및 해석 결과의 손쉬운 상호비교를 위해 정량화된 조종성능 비교 단순지수를 제안하고, 본 연구 결과를 이용한 해당 지수의 수치를 제시하여 단일

기관에서 수행한 조종성능 추정치의 일관성 있는 비교 가능성을 확인하였다.

2. 조종성능 추정 방법

본 연구에서는 Table 1과 같은 제원의 KCS 선형을 대상으로 정하였고, 실험 및 해석을 위한 축척비는 구속모형시험과 자유항주모형시험의 수행을 용이하게 하기 위해 1/42.0으로 결정하였다.

Table 1 Principal dimensions of KCS

	Lpp(m)	GM(m)	Kzz(Lpp)	Kxx(B)
Full-scale	230.0	0.60	0.25	0.40
Model-scale	5.476	0.014	0.25	0.40

제작된 모형선의 자유항주모형시험(Free Running Model Test, FRMT)은 대전의 방동저수지에서 2021년에 수행되었고 (Yun et al., 2021), 구속모형시험 형태의 수평면운동장치시험(Horizontal Planar Motion Mechanism Test, HPMMT)은 선박해양플랜트연구소의 예인수조에서 동일 모형선으로 같은 해에 수행되었다. 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 자유항주해석은 선박해양플랜트연구소가 개발하여 사용 중인 URANS(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식 기반의 해석 코드인 WAVIS를 통해 수행되었다.

모형시험과 해석에서 사용된 좌표계는 Fig. 1과 같이 통일하여 그 결과를 재정리하였고, 이때 타각의 방향은 지그재그시험의 해석 편의를 위하여 선체의 회전과 반대 방향을 양의 부호로 설정하였다. Figs. 2-4는 각각 자유항주모형시험, 구속모형시험의 실험장면과 전산유체해석을 위한 모델 및 격자생성 결과이다.

2.1 자유항주모형시험

IMO 표준조종시험(IMO, 2002) 중 대표적으로 수행되는 선회 시험, 지그재그시험, 나선시험을 통하여 주어진 KCS 선형에 대한 조종성능을 추정하였다. 연구소가 보유한 자유항주모형시험 장비 및 기법을 이용하여 옥외 자유항주모형시험을 수행하였다 (Yun et al., 2021). 시험절차는 ITTC 지침서를 준용하였고 (ITTC, 2014), 3회 이하의 반복시험을 통해 그 결과에 있어 반복성이 나타남을 확인하였다.

구속모형시험과 자유항주모형시험에 사용된 모형선은 동일하다. 시험속도 대응 프로펠러 회전수는 구속모형시험에서 얻어진 모형선의 자항결과로부터 결정하였으며, 자유항주 시 모형선이 실선기준 24노트에 해당하는 모형 시험속도에 도달함을 재확인하였다.

자유항주모형시험에서 단독으로 수행된 나선시험 결과에 대하여 타각별 선수동요각속도와 횡동요각을 실선기준으로 단순변환하면 Fig. 5와 같다. 그래프 형상에서 보듯이 직진안정성을 갖는 것을 확인할 수 있고, 횡동요각의 크기로 볼 때 횡경사각 15도

이내의 4자유도 구속모형시험이 필요한 것을 확인할 수 있다. 타각에 따른 수렴된 횡동요각의 경우 이전 연구와 유사한 경향성을 보이는 것으로 확인된다 (Milanov and Chotukova, 2009).

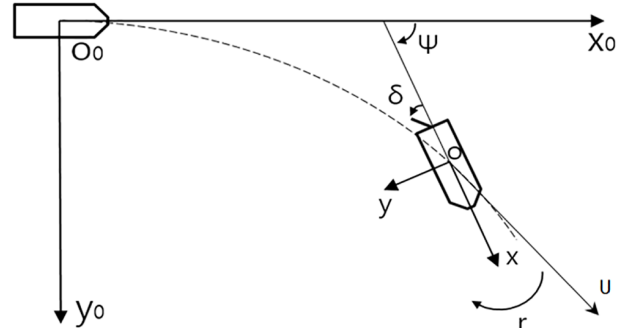


Fig. 1 Coordinate systems for model tests and analysis



Fig. 2 KCS model ship for FRMT (Yun et al., 2021)



Fig. 3 KCS model ship for HPMMT

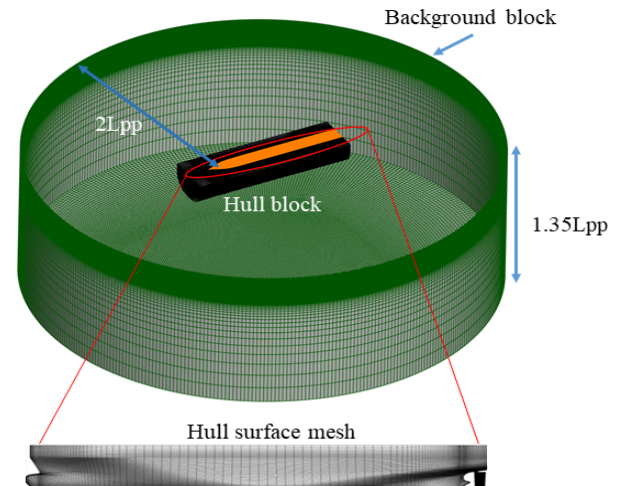


Fig. 4 KCS model ship for CFD

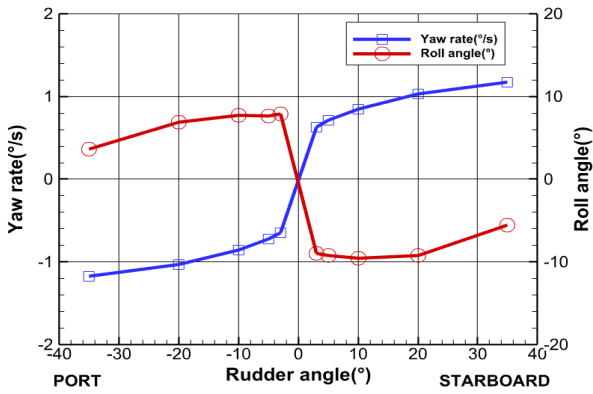


Fig. 5 Spiral tests data from FRMT

2.2 구속모형시험

모형선의 일반적인 4자유도 조종운동방정식은 식 (1)과 같다. 우변의 아래첨자 H, P, R은 각각 선체, 프로펠러, 타에 의한 외력을 의미한다 (Kim et al., 2011).

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr - x_G \dot{p}^2 + z_G \dot{p}) &= X_H + X_P + X_R & (1) \\
 m(\dot{v} + ur - z_G \dot{p} + x_G \dot{r}) &= Y_H + Y_R \\
 I_{xx} \dot{p} - m z_G (\dot{v} + ur) &= K_H + K_R \\
 I_{zz} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N_H + N_R
 \end{aligned}$$

각 외력 성분을 식 (2)-(4)와 같이 수식화할 수 있다. Res는 모형선 저항, W는 모형선 중량, GM은 횡메타센터높이이며, z_{Yv} 와 z_{Yr} 는 각각 사향과 선회에 의하여 발생하는 좌우방향 힘 작용점의 수직방향 위치이다. n, D_p , K_T 는 각각 프로펠러 회전수, 직경, 추력계수이다. z_R 는 좌우방향 타력 작용점의 수직방향 위치이다. 이외의 구체적인 정보는 앞서 명시한 Kim et al. (2011)의 연구에서 참고할 수 있으며, 선행 연구 대비 시뮬레이션에 영향이 미미한 일부 고차 비선형 항을 생략하여 선체력을 보다 단순하게 적용하였다.

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

$$X_P = (1-t)\rho n^2 D_p^4 K_T \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1-t_R) F_N \sin \delta & (4) \\
 Y_R &= -(1+a_H) F_N \cos \delta \\
 K_R &= -z_R Y_R \\
 N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta
 \end{aligned}$$

선박해양플랜트연구소 예인수조에서 4자유도 구속모형시험을 수행하였다. 횡동요가 포함된 4자유도 수학적모델을 구성하기 위하여, 운항상황 중 발생가능한 횡동요각의 크기를 고려하여 구속조건을 구성하였다. 횡경사 0, -5, -10°로 구속된 모형선의 선미부 사진은 Fig. 6과 같다.



Fig. 6 KCS model ship for 4 degrees of freedom HPMMT

정적 및 동적 시험 조건, 그리고 시험 별 도출되는 미계수 종류를 각각 Table 2, Table 3에 정리하였다. 시험속도는 실선기준 24 노트에 대응되는 모형선 속도로 정하였고, 선박의 조종 중 선속 감소를 고려하여 12-24노트 범위에서 유체력 특성을 도출하였다.

Table 2 HPMM static tests

	Heel angle [°]	Drift angle [°]	Rudder angle [°]	Speed [knots]	Derived coefficients
Static heel	0, -5, -10, -15	0	0	24, 16, 12	Y_ϕ, K_ϕ, N_ϕ
Static rudder		0	-35~35	24, 16, 12	$t_R, a_H, x_H, \epsilon, \kappa, z_R$
Drift & rudder	0, -5, -10	-24~24	3 angles	16	γ_R
Static drift		-24~24	0	24, 16, 12	$X_{vv}, Y_v, Y_{v v}, K_v, K_{v v}, N_v, N_{v v}, z_{Yv}, Y_{v \phi}, N_{v \phi}$

Table 3 HPMM dynamic tests

	Heel angle [°]	Drift angle [°]	Dynamic variable	Speed [knots]	Derived coefficients
Pure sway		-	\dot{v}' [-] 0.03 ~ 0.09	24	Y_v, K_v, N_v
Pure yaw	0, -5, -10	0	r' [-] 0.15 ~ 0.40	24, 16	$Y_r, K_r, N_r, X_{rr}, Y_r, Y_{r r}, N_r, N_{r r}, z_{Yr}, Y_{r \phi}, N_{r \phi}$
Yaw w/ drift	0	4~16	r' [-] 0.15 ~ 0.40	16	$X_{vr}, Y_{vvr}, Y_{vrr}, N_{vvr}, N_{vrr}$
Free roll decay	-	0	-	24, 16, 12, 0	K_p, K_ϕ

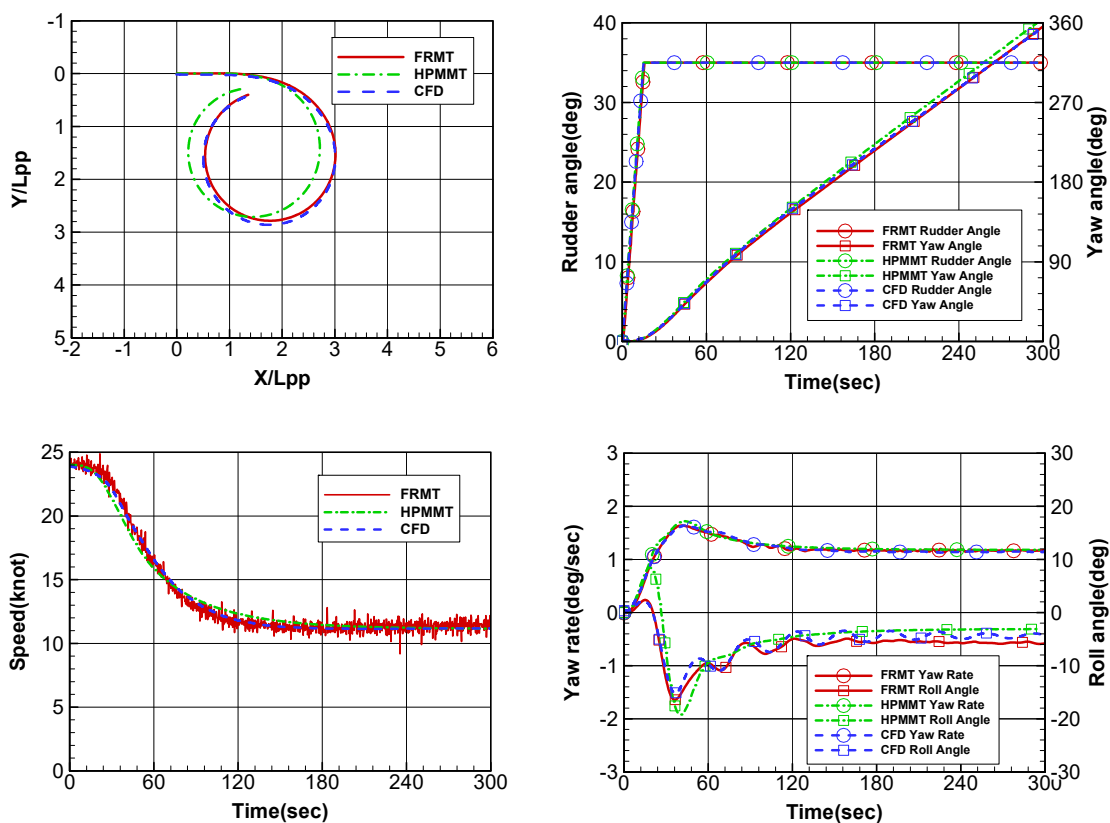


Fig. 7 +35° STBD turning tests data

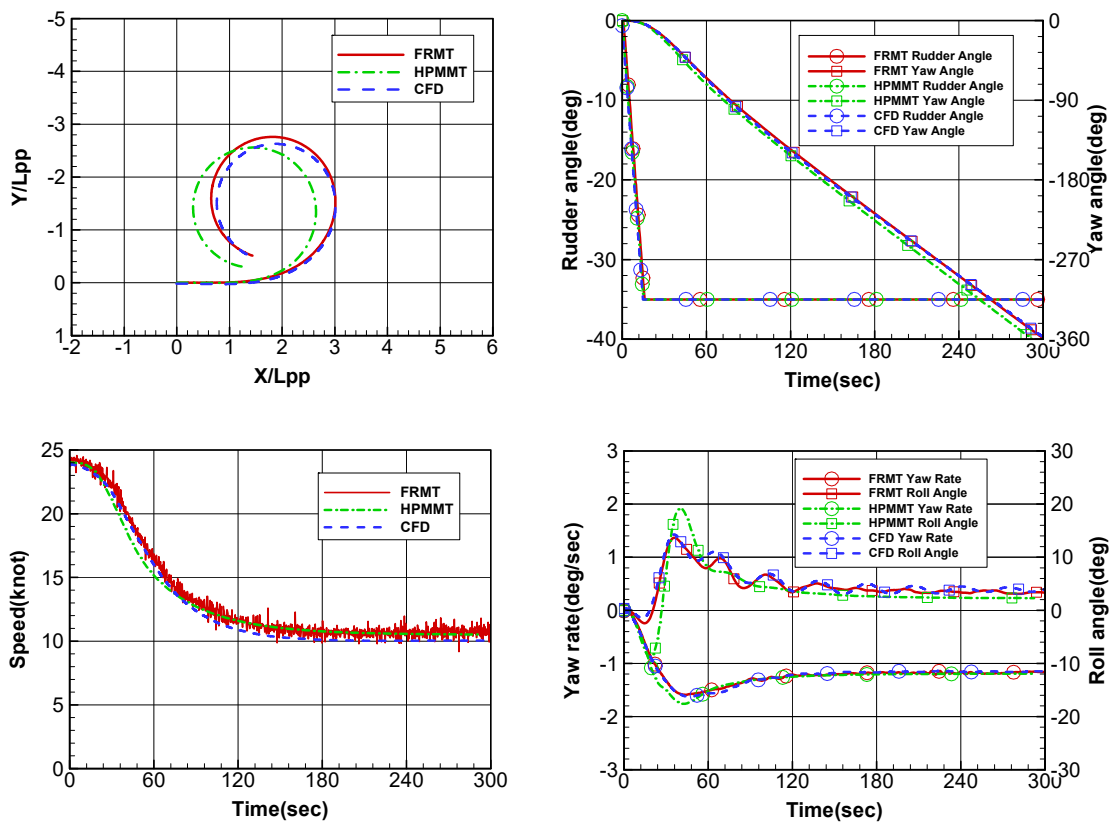


Fig. 8 -35° PORT turning tests data

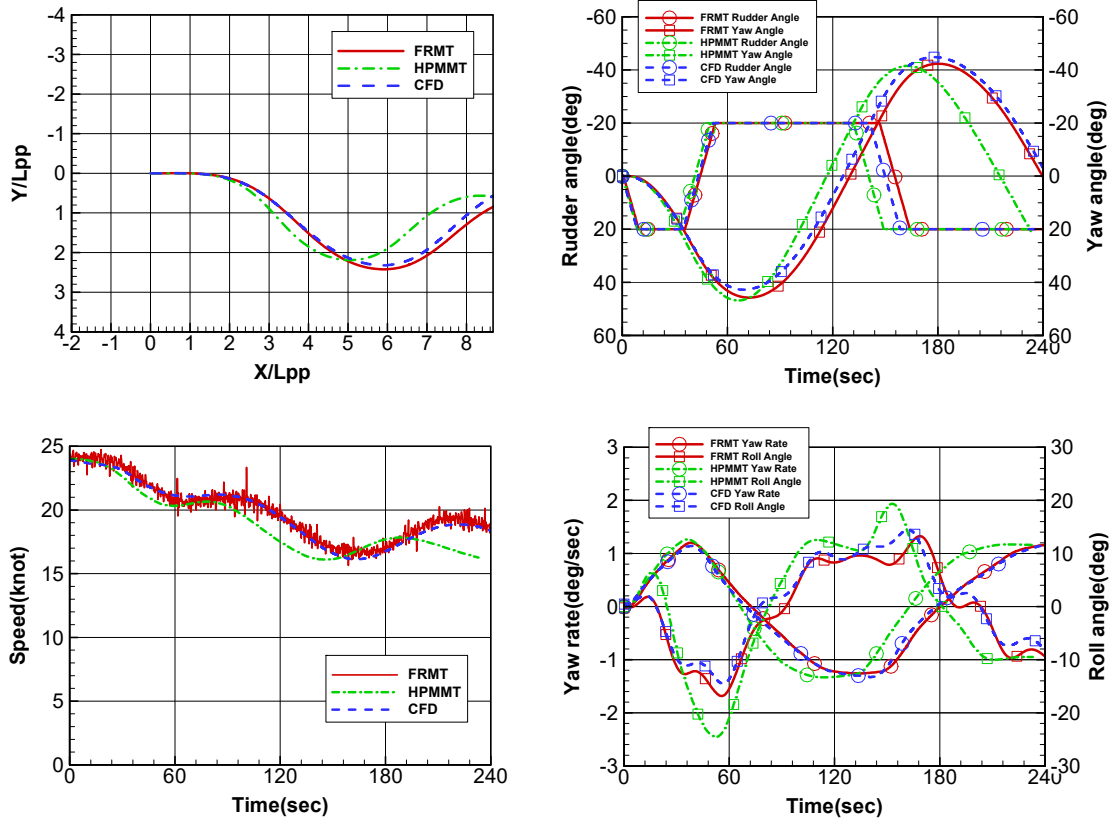


Fig. 9 +20/20 STBD zigzag tests data

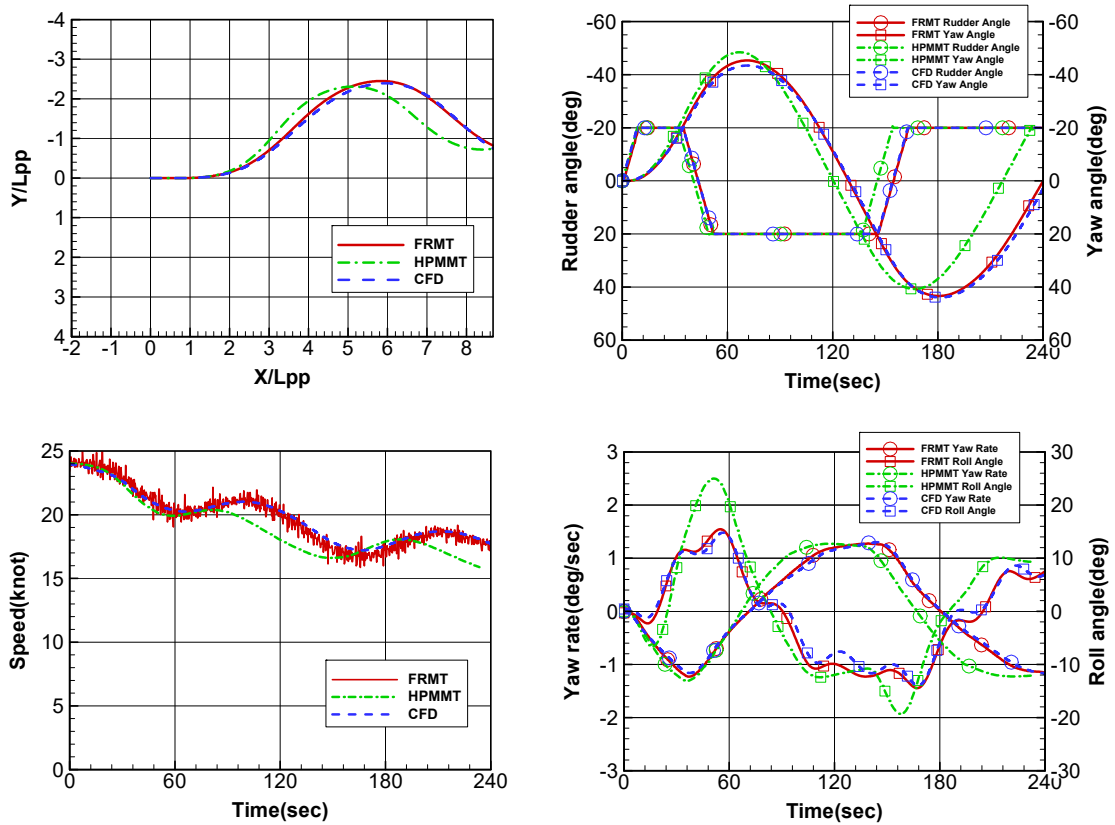


Fig. 10 -20/20 PORT zigzag tests data

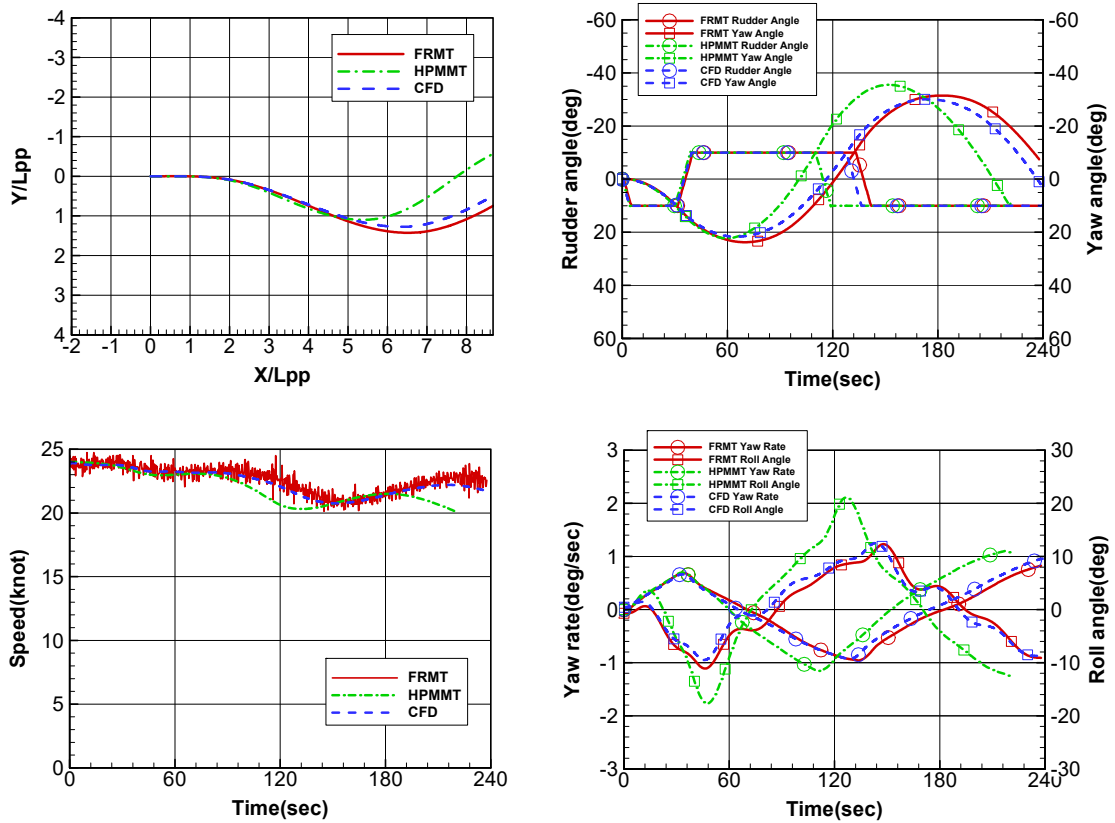


Fig. 11 +10/10 STBD zigzag tests data

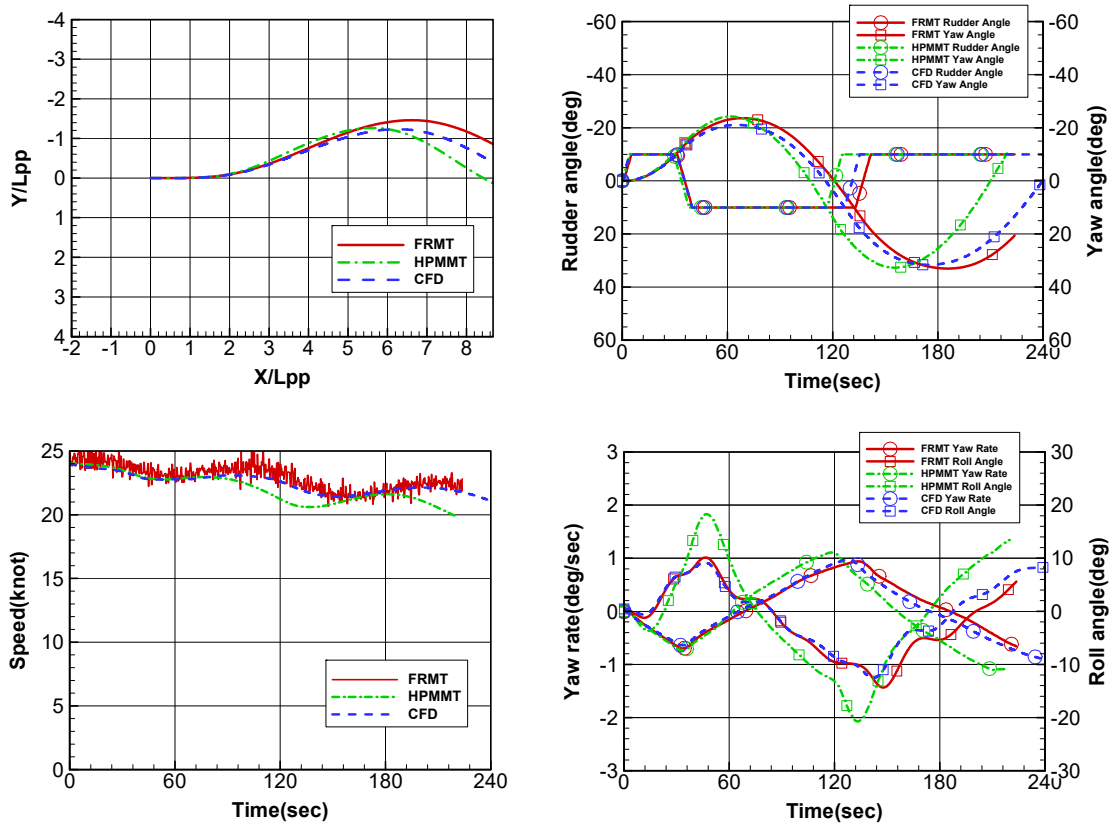


Fig. 12 -10/10 PORT zigzag tests data

구속모형시험으로부터 도출된 유체력 미계수로부터 선회 및 지그재그 조종시뮬레이션 수행 시, GM과 질량관성모멘트 등은 자유항주 모형선의 계측결과가 아닌 Table 1의 설계기준값을 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 Figs. 7-12에 자유항주모형시험 결과와 통합하여 나타내었다.

2.3 전산유체역학(자유항주) 해석

선박 주변의 유동장을 모사하기 위한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다. WAVIS는 초기 선속과 선체 길이 및 물의 밀도를 이용하여 무차원화된 Navier-Stokes 방정식을 사용하기 때문에 무차원화된 속도장 \mathbf{u} 에 대한 관계된 식들은 식 (5)-(7)과 같다.

$$\int_{\Gamma} \rho u_i n_i d\Gamma = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_{\Gamma} \rho u_i (u_j - V_j) n_j d\Gamma = \int_{\Gamma} \tau_{ij} n_j d\Gamma + \int_{\Omega} \rho b_i d\Omega \tag{6}$$

$$\tau_{ij} = \left(\frac{1}{Re} + \mu_T \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(p + \frac{z}{Fn^2} + \frac{2}{3}k \right) \delta_{ij} \tag{7}$$

위 식에서 Ω 는 Γ 를 경계면으로 가지는 검사체적(control volume)이고 ρ 는 유체밀도이며, p 는 압력, b 는 각 좌표축 x 방향의 단위질량 당 체적력을 나타낸다. n 는 단위 법선벡터, u 는 각 좌표축 방향의 유체속도 성분을 나타낸다. 이 때, V_j 는 격자의 이동속도를 의미하며 격자가 움직이지 않는 정적격자에 대해서는 0이 되어 일반적인 Navier-Stokes 방정식의 형태와 동일해진다. Re 와 Fn 은 각각 레이놀즈 수(Reynolds number)와 프루드 수(Froude number)를 의미하는 무차원 수이다. τ_{ij} 는 유효응력을 의미하고 μ_T 와 k 는 각각 난류 점성계수(turbulent eddy viscosity)와 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)에 해당한다.

선박의 조종 운동을 모사하기 위해서는 선체와 선체에 대해 상

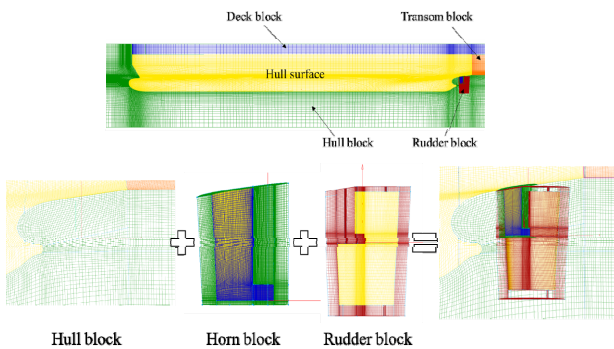


Fig. 13 KCS model ship mesh and rudder part (Yang et al., 2022)

대적으로 움직이는 타의 운동을 구현할 수 있어야 한다. WAVIS는 물체의 6자유도 운동 및 부가물의 독립적인 운동을 구현하기 위해 Fig. 13과 같이 중첩격자(overset mesh) 방식을 활용하고 있다. 본 연구에서는 유체장을 처리하기 위한 배경격자(background mesh) 위에 선체의 움직임과 타의 움직임을 처리하기 위한 격자(child mesh)들을 정의하여 조종 운동을 모사하는 방법을 (Kim et al., 2018b) 활용하였다.

선체의 운동방정식으로 각 시간 단계에서의 선박의 위치와 자세를 계산할 수 있다. 계산된 선박의 위치와 자세는 선체와 타를 처리하기 위한 중첩격자를 이동시키는 데 활용된다. 이러한 방법을 통하여 1/37.89 KCS 선형의 선회 및 지그재그시험에 대하여 격자구성의 타당성과 계산 결과가 검증된 바 있다 (Yang et al., 2022).

중첩격자 방식을 활용하여 사전 검증된 WAVIS 프로그램을 이용하여 본 연구의 1/42.0 KCS 모형시험과 동일한 조건, 설계기준값에서 자유항주 조종성능 해석을 수행하였다. CFD 선회시험과 지그재그시험 해석 결과 역시 Figs. 7-12에 자유항주모형시험 결과와 통합하여 나타내었다.

3. 결과 상호비교

앞서 소개한 자유항주모형시험, 구속모형시험, 전산유체역학(자유항주) 해석에 의한 1/42.0 축척비 KCS 선형의 선회 및 지그재그 조종성능 추정결과는 좌우현 각각에 대하여 Figs. 7-12에 시계열로 표현되어 있다. 모형선 기준 계산결과를 축척비에 따라 실선에 맞게 단순 변환하였다.

시계열로부터 획득한 조종성능지수 및 다양한 정보에 대하여 좌우현 평균값으로 Tables 4-6에 제시하였다.

선회시험과 지그재그시험은 전진거리, 전술직경, 오버슈트각 등과 같은 다양한 조종성능지수를 보여준다. 이를 개별적으로 각각 비교하지 않고 하나의 수치로 통합하여 비교하기 위한 방법으

Table 4 ±35° turning indices(average)

Index		HPMNT	FRMT	CFD
Turn	Advance, Ad(L)	2.66	2.95	2.93
	Time to reach Ad(s)	73.2	76.9	75.6
	Tactical diameter, TD(L)	2.61	2.70	2.66
	Time to reach TD(s)	143.5	148.9	146.9
	Maximum yaw rate(°/s)	1.74	1.62	1.63
	Final yaw rate(°/s)	1.19	1.17	1.16
	Maximum roll angle(°)	19.23	15.03	14.73
	Final roll angle(°)	2.70	4.58	4.32
	Final speed(knots)	10.84	10.96	10.59
	Final drift angle(°)	11.02	19.53	20.30
	Propeller RPS	1.96	1.96	-

Table 5 ±20/20 zigzag indices(average)

Index		HPMMT	FRMT	CFD
Zigzag	First overshoot angle(°)	27.60	25.55	23.05
	Time to reach first OA(s)	66.4	71.8	70.5
	Second overshoot angle(°)	21.12	22.83	24.35
	Time to reach second OA(s)	164.6	180.2	179.6

Table 6 ±10/10 zigzag indices(average)

Index		HPMMT	FRMT	CFD
Zigzag	First overshoot angle(°)	13.30	13.68	11.40
	Time to reach first OA(s)	60.6	69.2	65.2
	Second overshoot angle(°)	24.10	22.25	20.85
	Time to reach second OA(s)	153.6	183.9	174.2

로 조종성능 비교 단순지수(Maneuvrability Comparing Simple Index, MCSI)를 다음의 사항을 고려하여 제안하였다.

각각의 시험, 해석결과에 대한 상호간 비교 일관성을 유지하기 위하여 기준 수치의 설정을 첫 번째로 고려하였다. 두 결과를 상호 비교할 때 실험이나 해석에서 추정된 수치를 기준으로 잡을 경우 그 기준량이 비교할 때 마다 변경되므로, IMO에서 제시하는 조종성능 기준을 기준량의 절대수치로 설정하였다. 두 번째는 선회성능과 변침성능은 직진안정성 측면에서 서로 반대의 경향을 나타내는 경우가 많으므로, 동일한 비율로 반영하였다. 이 때 선회성능은 35도 선회시험의 전진거리와 전술직경 두 지수를 고려하였고, 변침성능은 10/10지그재그시험의 1차, 2차 오버슈트각, 20/20지그재그시험의 1차 오버슈트각 세 지수를 고려하였다. 마지막으로 조종성능 지수와 관련된 시간정보는 단순계산용 본 지수에는 포함하지 않는 것으로 하였다.

이를 반영한 최종 조종성능 비교 단순지수 계산은 식 (8), 식 (9)와 같은 수식으로 표현이 가능하다.

$$MCSI_{total} = \frac{MCSI_{turn} + MCSI_{zigzag}}{2} \quad (8)$$

$$MCSI_{turn} = \frac{|MCSI_{Ad(35)}| + |MCSI_{TD(35)}|}{2} \quad (9)$$

$$MCSI_{zigzag} = \frac{|MCSI_{OA1(2020)}| + |MCSI_{OA1(1010)}| + |MCSI_{OA2(1010)}|}{3}$$

예를 들어 자유항주모형시험과 구속모형시험의 선회성능 중 전진거리에 대한 비교 지수는 식 (10)과 같이 계산되고, 변침성능 중 20/20지그재그 1차 오버슈트각에 대한 비교 지수는 식 (11)과 같이 계산된다. 각각의 조종성능지수는 Tables 4-6과 같이 좌우현 평균값을 사용하였다.

$$|MCSI_{Ad(35)}| = \left| \frac{Ad_{FRMT} - Ad_{HPMMT}}{Ad_{IMO}} \right| \quad (10)$$

$$= \left| \frac{2.95 - 2.66}{4.50} \right| = 6.5\%p$$

$$|MCSI_{OA1(2020)}| = \left| \frac{OA1_{FRMT} - OA1_{HPMMT}}{OA1_{IMO}} \right| \quad (11)$$

$$= \left| \frac{25.55 - 27.60}{25.00} \right| = 8.2\%p$$

식 (8)로 표현되는 조종성능 비교 단순지수는 조종성능 기준 대비 두 추정 결과의 차이에 해당되는 것이므로, 그 수치가 작을 수록 비교 오차가 작고 좀 더 동일한 결과를 주는 것을 의미한다. 이 방법을 이용하여 계산한 1/42.0 축척비 KCS 모형선의 조종성능 비교 단순지수는 Table 7과 같다. 자유항주모형시험 결과를 기준으로 볼 때 약 5 %p 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Table 7 MCSI comparison

Tests	$MCSI_{total}$	$MCSI_{turn}$	$MCSI_{zigzag}$
FRMT <-> CFD	5.4 %p	0.6 %p	10.1 %p
FRMT <-> HPMMT	4.8 %p	4.1 %p	5.6 %p

4. 결론

본 논문에서는 KCS 모형선의 조종성능을 추정하기 위하여 자유항주모형시험, 구속모형시험, 전산유체해석의 세 가지 방법을 통하여 선회시험, 지그재그시험 결과를 획득하고 상호 비교하였다. 최근 5년간 지속적으로 개선된 시험장비와 해석기법들을 통하여, 2021년 수행 기준 각각의 시험자료와 해석자료를 그 결과물로 공개하였다. 또한 획득된 조종성능 추정 결과를 상호 비교하기 위한 정량화된 비교수식으로 조종성능 비교 단순지수를 제안하였고, 이를 통하여 제시된 KCS 모형선 조종성능의 경우 5 %p 내외의 상호 오차가 보이는 것을 확인하였다. 이는 SIMMAN 등 대내외 공개 결과와 비교해 볼 때, 의미있는 조종성능추정 정밀도를 확보한 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 선박해양플랜트연구소 단일 기관에서 수행한 조종성능추정 결과물들이 비교 정밀도 측면에서 보다 일관성 있는 연구 결과물로 제시된 것으로 판단하며, 제안한 조종성능 비교 단순지수는 향후 관련 연구자들의 조종성능 추정과 관련된 정밀도 계산과 개선을 위한 오차기준이 될 수 있을 것으로 판단한다. 본 논문에 제시된 자료는 향후 기관별 벤치마크를 위한 자료로 공개할 예정이며, 타 연구기관에서 비교자료 등으로 활용되기를 희망한다.

향후 연구사항으로는 본 논문에서 제시된 1/42.0 축척비의 KCS 선형 외, 1/65.8 및 1/31.6 축척비의 KCS 구속모형시험 및 자유항주 전산유체해석 결과를 추가적으로 공개하고, 축척비에

의한 모형선의 조종성능추정 정밀도를 상호 비교분석하여 실선의 운항성능 해석에 보다 근접한 실험과 해석의 방법에 대하여 논의 할 예정이다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “첨단운송체의 항내 운항성능향상을 위한 축척효과를 고려한 운항제어원천기술 개발(3/5)”, “수중운동체 운항성능 통합 추정 기술개발(3/5)”에 의해 수행되었습니다. 본 논문의 실험 및 해석자료는 향후 선박 해양플랜트연구소 홈페이지를 통하여 공개될 예정입니다 (PES3860, PES4250, <https://kriso.re.kr>).

References

Assani, N., Matic, P. and Katalinic, M., 2022. Ship’s digital twin—a review of modelling challenges and applications. *Applied sciences*, 12(12), 6039.

IMO, 2002, *Standards for ship manoeuvrability*, IMO Resolution MSC.137(76) (adopted on 4 December 2002).

ITTC, 2014, Recommended procedures and guidelines, *Free running model tests*, pp.3–4.

KBS, 2022, *Successful experimental demonstration for Korea autonomous surface ship*, Available at: <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5480339> [Accessed 15 June 2022].

Kim, K., Kim, H., Choi, S., Na, K.I., Lee, H. and Seo, J., 2022. Development of ship dynamics model by free-running model tests and regression. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(3), pp.173–182.

Kim, K.H., Kim, Y.B. and Ji, S.W., 2018a. A study on ship motion control system design for autonomous ship. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 54(3), pp.231–238.

Kim, Y.C., Kim, Y., Kim, J. and Kim, K.S., 2018b. Added resistance and 2DOF motion analysis of KVLCC2 in regular head waves using dynamic overset scheme. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(5), pp.385–393.

Kim, Y.G., Yeo, D.J., Son, N.S., Kim, S.Y., Yun, K. and Oh, B.I., 2011. Prediction of maneuverability of KCS with 4 degrees of freedom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.267–274.

Milanov, E. and Chotukova, V.Y., 2009. Roll motion of containership in shallow water. *International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water*, Antwerp, Belgium, 13–15 May 2009.

Park, J.Y. and Lee, J.H., 2020. A study on full-scale maneuvering trials using bow thruster. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(1), pp.52–59.

SIMMAN, 2020, *Instructions to participants*, Available at: <http://www.simman2020.kr> [Accessed 15 June 2022].

Sung, Y.J. and Park, S.H., 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based on virtual captive model tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), pp.407–417.

Yang, K.K., Kim, Y.C., Kim, K.S. and Yeom, S.M., 2022. Numerical analysis on turning and yaw checking abilities of KCS in calm water a based on free-running simulations. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(1), pp.1–8.

You, Y., 2019. Different approaches for estimating the full-scale performance of a ship based on 3-DOF maneuvering equations of motion: given speed, RPM or power. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(5), pp.427–438.

Yun, K., Choi, H., and Kim, D.J., 2021. An experimental study on the manoeuvrability of KCS with different scale ratios by free running model test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(6), pp.415–423.

