

KCS 선형의 규칙파 중 구속모형시험에 대한 연구

최후재¹·김동진²·김연규^{2,†}·여동진²·윤근항²·이경중²
아비커스¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소²

A Study on the Captive Model Test of KCS in Regular Waves

Hujae Choi¹·Dong Jin Kim²·Yeon Gyu Kim^{2,†}·Dong Jin Yeon²·Kunhang Yun²·Gyeongjung Lee²
Avikus Co., Ltd.¹
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering²

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.

In order to investigate maneuvering characteristics of KCS in waves, captive model test in regular waves was conducted. Purpose of the test is measuring maneuvering hull forces when ship is maneuvering in waves. Model test was carried out using CPMC (Computerized Planar Motion Carriage) of ocean engineering basin in KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering). Total 6 degrees-of-freedom motion were fixed by two points supporting captive model test device, which is specially designed for this test. This system estimates 6 degrees-of-freedom forces and moments through 12 strain gauge signals. Mapping matrix from strain gauge signals to 6 degrees-of-freedom forces and moments was derived by a well-organized calibration test. Static drift test was conducted in calm sea and in regular waves with various wave conditions. Hydrodynamic coefficients related to drift angle were extracted for each wave conditions, and the effect of waves on course stability was analyzed.

Keywords : Captive model test(구속모형시험), Regular waves(규칙파), Static drift test(정적사항시험), Ocean engineering basin(해양공학수조)

1. 서론

일반적으로 선박의 조종성능은 정수중에서 모형선 또는 실선을 이용하여 평가된다. 하지만 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 황천중에서의 조종성능을 유지할 수 있도록 최소추진출력을 갖는 엔진의 마력 선정에 대한 규제(IMO MEPC, 2021)를 시행하였고, 이에 따라 파도 중 조종성능 추정에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있다. 유럽에서는 SHOPERA (Energy Efficient Safe Ship OPERAtion) 프로젝트가 수행된 바 있으며, 일본에서도 일본조선해양공학회 중심으로 JASNAOE 프로젝트가 수행된 바 있다.

파도 중 조종성능을 검토하기 위한 방법으로는 파도 중 자유항주 모형시험이 가장 직관적이다. 이와 관련된 여러 선행 연구들이 있다. Ueno et al. (2003)은 VLCC 선형에 대해서 규칙파 중 선회시험, 지그재그시험 및 정지시험을 수행한 바 있으며, Yasukawa (2006a, 2006b)는 S-175 컨테이너선에 대해서 규칙파 및 불규칙파 중 선회시험을 수행한 바 있다. 또한 Kim et al.

(2019, 2020, 2022)은 KVLCC2 선형에 대한 규칙파 및 불규칙파 중 자유항주 선회시험과 KCS 선형에 대한 규칙파 중 자유항주 선회시험을 수행한 바 있다.

SHOPERA 프로젝트에서는 보다 많은 모형시험이 수행되었는데, KVLCC2 선형과 DTC 컨테이너선에 대해서 파에 의한 표류력을 추정하기 위한 내항시험 및 규칙파와 불규칙파 중 자유항주 선회시험을 수행하였다.

파도 중 조종운동을 해석하기 위한 수치 시뮬레이션 연구도 다음과 같이 수행되었다. Ottosson and Bystrom (1991)은 운동방정식에 고정된 부가질량과 감쇠 계수들을 사용하여 계산하였고, Fang et al. (2005)은 파도의 조우 주파수에 따른 동유체력 계수를 이용한 운동방정식을 제안하였다. 이것은 Ottosson and Bystrom의 운동방정식을 개선한 것이지만, 파도에 의한 메모리 영향을 고려하지 않았다. Lee (1992)는 파도 중 조종 문제에 대해서 메모리 영향의 의미를 검토하였으며, Bailey et al. (1997)은 컨벌루션 적분을 이용한 메모리 영향을 고려하는 방법을 제시하였다. Skejic and Faltinsen (2008)은 2차 파 표류력을 이용

한 two-time scale model을 제시하였으며, 이것은 저주파수 조종운동과 고주파수 파도운동을 분리하여 시뮬레이션하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 많은 시뮬레이션 연구가 수행되었으며, Seo et al. (2011), Seo and Kim (2011), Seo (2016), Seo et al. (2018)은 시간영역 Rankine 패널 방법을 이용하여 파도 중 조종 시뮬레이션을 수행하고 시험결과와 비교하였다.

파도 중 조종성능을 검토하는 또 다른 방법이 파도 중 구속모형 시험이다. Ueno et al. (2000)은 단파장 파($\lambda/L_{BP}=0.2$)에서 VLCC 선형의 사항상태와 선회상태에 대하여 계산에 의한 추정결과와 시험결과를 비교하였다. 모형선의 6자유도 운동을 고정하지 않았으며, 이에 의해 선회상태에서의 사항각 최대 오차는 0.4° 이었다. Yasukawa and Adnan (2006)은 S-175 컨테이너선에 대해서 선수파와 횡파 상태에서의 사항시험을 수행하였으며, 이때 모형선의 6자유도 운동은 스프링 예인줄로 구속하여 운동을 자유롭게 하였다. 이에 따라 10° 사항상태에서 최대 1.3° 정도의 사항각 오차가 발생하였고, 이 때 발생한 오차를 최종 사항각에 고려하여 분석하였다. Jeon et al. (2015)은 PMM(Planar Motion Mechanism) 모형시험을 4600 TEU 컨테이너선에 대하여 수행하였으며, 정수와 파도 중 동유체력 계수를 구하여 침로안정성 변화를 검토한 바 있다.

본 논문에는 파도 중 조종성능 특성을 검토하기 위해서 규칙 파 중 구속모형 시험결과를 보여주고 있으며, 이를 위해 여러 파도 조건에 대해서 정적사항시험을 수행하였다. 정적사항시험 중 모형선의 6자유도 운동에 의한 계측값의 영향을 배제하기 위하여 6자유도 운동을 고정하였으며, 이에 따라 모형선에 의한 방사 현상이 발생하지 않았다. 모형시험의 대상선형은 다수의 연구가 수행된 KCS 선형이며 (SIMMAM, 2008; Kim et al., 2009; Kim et al., 2011; Yang et al., 2022), 계측값에 대한 분석 및 사항각 선형구간에 대한 선형 조종유체력 미계수들을 구했고, 사항각에 의한 침로안정성을 분석하여 그 결과에 대해 고찰하였다. 본 시험결과는 특히 6자유도 운동이 자유스러운 상태에서 파도 중 운동과 유체력을 구하는 CFD 계산을 수행하기 전에 파도 중 6자유도 운동이 고정된 상태에서 CFD 계산을 수행하여 CFD 계산기법의 유효성을 비교/검증하는데 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

2. 모형시험

2.1 해양공학수조

모형시험은 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소(이하 KRISO)의 해양공학수조에서 수행되었다. Fig. 1에 해양공학수조의 전경이 나타나 있다. 사진의 전면과 왼쪽 벽에 피스톤 타입의 조파기가 설치되어 있으며 규칙파와 불규칙파를 생성할 수 있고, 반대쪽 벽에는 소파기가 설치되어 있다. 해양공학수조의 크기는 길이방향으로 56 m, 폭방향으로 30 m, 그리고 수심은 최대 4.5 m이다. 모형시험 중 모형선이 정속에 도달한 후 최소 5 주기의 파를 만나도록 시험이 수행되었다.



Fig. 1 Ocean engineering basin of KRISO

2.2 대상 선형

대상 선형으로 공개선형인 KCS(KRISO container ship)을 사용하였다. 모형시험은 프로펠러를 제외한 선체와 타가 있는 상태에서 수행되었으며, 모형선의 중앙(Midship) 좌우현에는 파고를 계측할 수 있는 초음파 파고계를 각각 설치하였다. Table 1에는 KCS 선형의 제원이 실려 있고, Fig. 2는 시험 수행 전 모형선의 사진이다. Table 1에서 L_{BP} 는 선박의 수선간 길이를 의미하며, F_n 은 후루드 수(Froude number= $U/\sqrt{gL_{BP}}$)를 의미한다.



Fig. 2 KCS container model ship

Table 1 Principal dimensions of target ship

Item	Real ship	Model ship
Scale ratio	65.83	
L_{BP}	230.0 m	3.49 m
Displacement	52030 m ³	0.1818 m ³
F_n	0.173	
Ship speed	16 knots	1.014 m/s

2.3 시험 장비

2.3.1 구속모형 시험장치

구속모형 시험장치는 선수와 선미에 2개의 스트럿을 통해 모형선을 완전히 구속한다. 선수, 선미 스트럿과 모형선 사이에 각

각 6축 게이지(Advanced Mechanical Technology, Inc.(AMTI)의 UDW3 게이지)가 설치되었으며 모형선에 작용하는 힘과 모멘트를 계측한다. 파도 중 모형선의 6자유도 운동이 발생하지 않도록 스트럿 및 게이지는 고정된 상태에서 시험을 수행하였다. 스프링을 포함한 예인줄로 구속을 할 경우 모형선의 운동에 의하여 사향각에 변화가 발생하며, 이를 방지하기 위한 조치이다. 이에 따라 선체의 운동에 의하여 방사되는 파와 힘은 나타나지 않게 된다. 다만 두 게이지간의 간섭현상을 방지하고 원하는 축의 분력만을 계측할 수 있도록 게이지와 모형선 연결부위에 힌지를 두었다. Fig. 3은 구속모형 시험장치의 사진이고, Fig. 4는 해양공학수조의 CPMC(Computerized Planar Motion Carriage)에 구속모형 시험장치와 모형선이 설치된 사진이다.

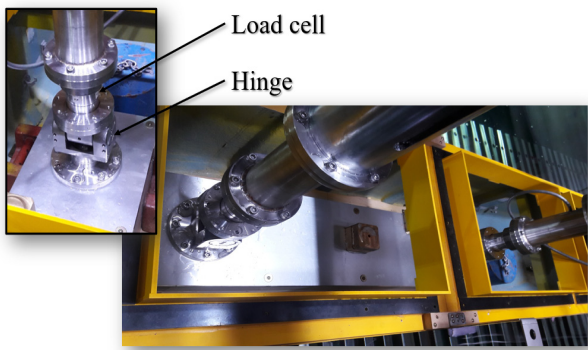


Fig. 3 Captive model test device

2.3.2 게이지 캘리브레이션

본 구속모형시험에서 모형선에 작용하는 유체력은 스트롱백과 힌지를 통해 게이지에 전달된다. 게이지간의 간섭현상을 최소화하기 위한 선수 힌지와 선미 힌지 사진이 Fig. 5에 실려 있다. 스트롱백의 길이방향 중심은 선체의 중앙(Midship)이며, 수직면 위치는 흡수선 높이이다.

본 구속모형 시험장치의 교정시험으로 두 방법을 검토하였다. 첫 번째는 각 선수, 선미의 6축 게이지에 대한 개별 교정시험을 수행하여 선수 게이지와 선미 게이지에 작용하는 힘과 모멘트를 합하는 방법이다. 이를 두 개의 6x6 교정 매트릭스를 도출했으므로, 'Double 6x6 방법'으로 부르기로 한다. 두 번째로는 게이지와 힌지, 스트롱백을 교정시험 장치에 구속한 후 스트롱백에 힘과 모멘트를 가하는 방식이다. 즉 이 방법은 스트롱백에 힘과 모멘트를 가했을 때 발생하는 12개의 전기 신호를 한 번에 6분력으로 변환시켜주는 6x12 교정 매트릭스를 도출하는 방법이다. 이를 'Single 6x12 방법'으로 부르기로 한다.

Single 6x12 방법은 스트롱백과 힌지, 로드셀을 포함한 전체 시스템에 대한 교정시험을 수행한다는 점에서 전체 구속시스템의 상호 관계를 고려해 주었다고 할 수 있다. 해당 교정시험을 수행하기 위해 특별히 제작된 교정시험 장치가 사용되었으며, Fig. 6과 같다. 본 연구에서는 두 방법의 교정시험을 수행한 후 이에 대한 결과를 비교하였다.

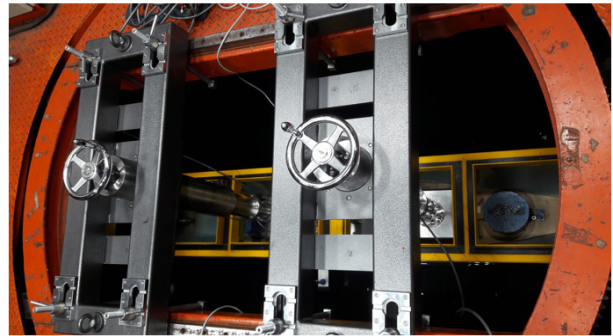
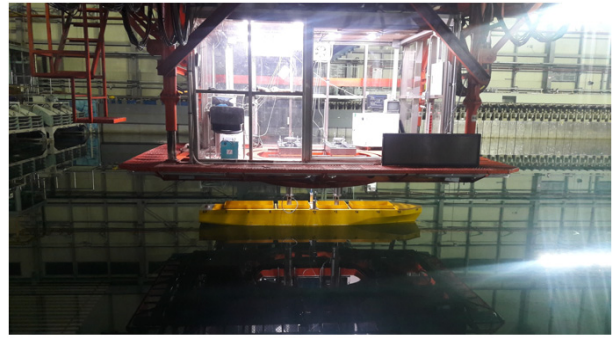


Fig. 4 KCS model ship installed with captive model test device



Fig. 5 Bow and stern hinge

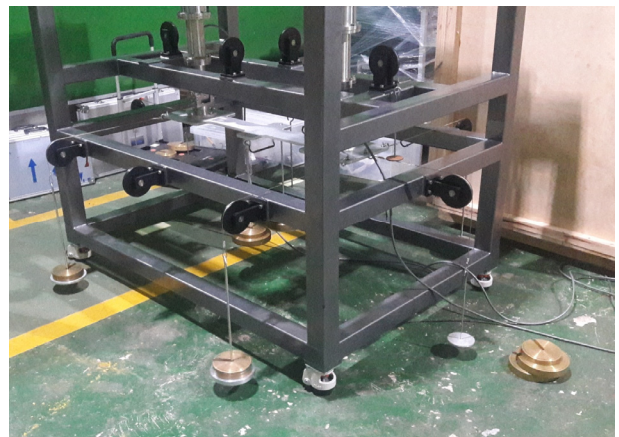


Fig. 6 Calibration test using calibration test device

두 교정시험 방법의 정확도를 비교하기 위해 교정시험에 사용되지 않은 임의의 추 배치에 대한 실제 추 무게와 교정시험 매트릭스 변환 값을 비교하였다. 비교 결과는 Table 2와 같다. Single 6x12 방법을 통해 도출한 값이 더 정확한 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있으며, 특히 본 연구에서 주로 관심있는 횡방향 힘과 선수동요 모멘트는 1% 내외의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison between 'Double 6x6 method' and 'Single 6x12 method' by validation set

Force component	Value	Real weight	Double 6x6 method	Single 6x12 method
X	value [N]	39.24	39.664	38.81
	error [%]	-	1.08	1.10
Y	value [N]	49.05	50.624	49.785
	error [%]	-	3.21	1.50
Z	value [N]	117.72	118.216	118.04
	error [%]	-	0.42	0.27
K	value [N]	2.943	3.236	3.037
	error [%]	-	9.96	3.19
M	value [N]	25.997	23.135	26.941
	error [%]	-	11.01	3.64
N	value [N]	25.997	24.731	25.721
	error [%]	-	4.87	1.06

따라서, 본 구속모형시험 결과에서 표시한 모든 실험 결과 값은 Single 6x12 방법을 사용하여 추출한 교정값을 이용하여 계산하였다.

2.3.3 데이터 취득 시스템

파도 중 수행된 구속모형시험에서는 모형선에 작용하는 6자유도 힘과 모멘트, 선체중앙 좌우현 위치에서의 파고, CPMC에 의한 모형선의 위치 및 방위각이 계측된다. 이를 위한 총 17개의 신호선이 NI USB-6289를 통해서 물리량으로 결과를 보내준다. Fig. 7에 데이터 취득 시스템에 대한 상세 흐름도가 나타나 있으며, 계측 프로그램은 Labview 소프트웨어를 이용하여 개발하였다.

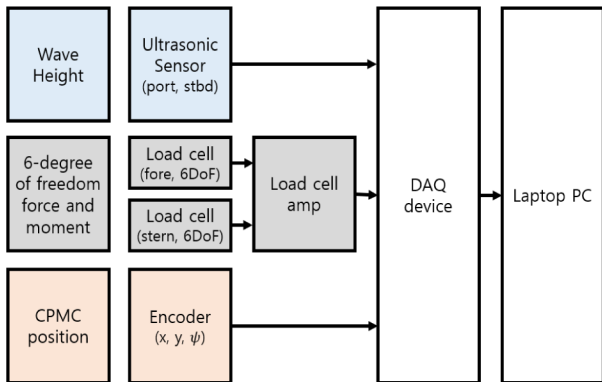


Fig. 7 Flow chart of data acquisition system

2.4 시험 조건

Table 3에 정적사향 시험조건이 실려 있다. 정수 및 파도가 있는 상태에 대한 시험이 각각 수행되었으며, 기준 파고는 $H/L_{BP}=0.02$ 이고, 파장 $\lambda/L_{BP}=1.0$ 에 대해서는 $H/L_{BP}=0.015$ 파고도 추가하여 수행하였다. 사향시험 중 파향 (χ)이 일정하게 유지되

도록 모형선의 진행방향을 선정하여 시험이 수행되었다.

Table 3 Static drift test conditions

Test	Condition	
	Wave length (λ/L_{BP})	Drift angle ($^\circ$)
Calm water	-	0, ± 2 , ± 4 , ± 6 , 9, 12, 18
Head sea ($\chi=180^\circ$)	0.7	0, 2, 4, 6, 9, 12
	1.2	0, 2, 4, 6, 12
	1.0, 0.5	0, 2, 4, 6
	1.5	0
Beam sea ($\chi=90^\circ$)	0.7	0, ± 2 , ± 4 , ± 6 , 9, 12, 18
	1.2, 1	0, ± 6
	1.5, 0.5	0

3. 조종 수학 모델

3.1 좌표계

선박의 조종 수학 모델은 Fig. 8의 좌표계를 적용하여 기술하였다. $o-x_0y_0$ 좌표계는 지구고정 관성좌표계이고, $O-xy$ 좌표계는 선체의 중앙(Midship)에 원점을 둔 선체고정 비관성좌표계이다.

선수 방향각도 ψ , 사향각 β 는 그림과 같이 정의되어 있고, U 는 모형선 속도를 나타낸다. 본 논문에서는 선체길이 방향 및 횡방향 힘과 선수동요 모멘트에 대해서만 분석을 수행하기 때문에 수평면 힘과 모멘트를 고려하는 수평면 좌표계만 이용하였다.

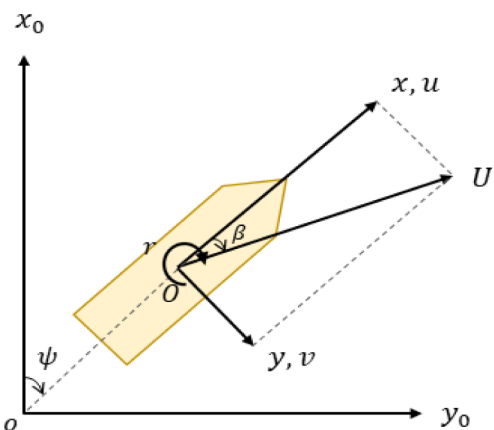


Fig. 8 Ship coordinates system

3.2 유체동역학 모델

선박의 수평면 조종운동을 기술하기 위하여 다음 식과 같이 3자유도 조종유체력 수학모델을 사용하였다.

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

위의 식에서 X, Y, N 은 시험에서 측정된 힘과 모멘트를 나타내며 각각 선체길이 방향 힘, 횡방향 힘 및 선수동요 모멘트이다. 단, u, v, r 은 각각 선체길이 방향 속도, 횡방향 속도 및 선수동요 각속도를 의미한다. m 과 I_{zz} 는 선박의 질량과 선수동요 관성모멘트를 나타내고, x_G 는 선체길이 방향 무게중심 위치를 나타내며 선체 중앙에서 선수방향이 (+)이다. $\dot{\cdot}$ 는 시간에 대한 미분을 나타낸다.

정적사항시험 상태에 대한 유체동역학 모델을 다음 식과 같이 표현하였다. 횡방향 힘(Y)과 선수동요 모멘트(N)는 사항각 범위를 선형구간($-6^\circ \leq \beta \leq 6^\circ$)으로 한정하여 선형 유체력계수만으로 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 X &= X_0 + X_{vv} v^2 \\
 Y &= Y_0 + Y_v v \\
 N &= N_0 + N_v v
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식 (1)과 (2)의 힘과 모멘트는 SNAME(Society of Naval Architects and Marine Engineers)에서 정의한 방식으로 무차원화하였으며, 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 F' &= \frac{F}{0.5\rho L_{BP}^2 U^2} \\
 M' &= \frac{M}{0.5\rho L_{BP}^3 U^2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

위의 식에서 ρ 는 유체의 밀도이다.

4. 시험 결과

모든 시험은 후루드 수 0.173에서 수행되었으며 실선 속도 16 knots 및 모형선 속도 1.014 m/s에 해당한다.

4.1 파도에 의한 평균 유체력

본 실험에서는 파의 주기를 고려하여 평균 유체력을 계산하였다. 측정된 힘에는 비선형성과 잡음이 포함되어 있으므로 이를 고차 정현파함수로 피팅하였다. 정현파함수의 차수는 최대 3차로 하였으며, 측정된 힘을 3차 정현파함수로 피팅하는 것은 아래 식에서 $a_0 \sim a_3$ 에 해당하는 계수를 구하는 것과 같다. 또한 아래 식에서 w_e 는 모형선과 파도의 조우주파수에 해당한다.

$$Y = a_0 + a_1 \sin(w_e t) + a_2 \sin(2w_e t) + a_3 \sin(3w_e t)
 \tag{4}$$

Fig. 9는 정적사항시험 결과의 예시로, 횡파($\chi=90^\circ$) 사항시험 중 횡방향 힘을 나타내었다. 그래프에는 실험 중에 측정된 횡방향 힘의 원본 데이터와 1차부터 3차 정현파함수로 피팅된 결과, 그리고 평균 유체력이 나타나 있다.

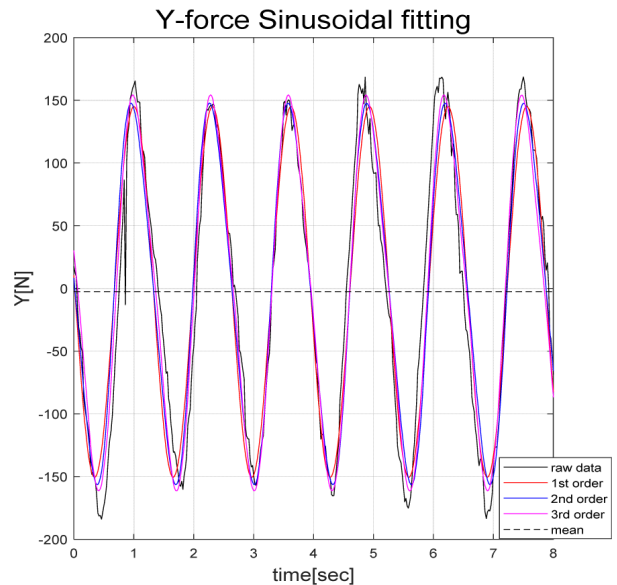


Fig. 9 Y force sinusoidal fitting result

실험 중 측정된 힘에 대한 진동 및 노이즈의 영향과 지배적인 주파수 성분을 분석하기 위해 주파수 해석을 수행하였다. 측정된 힘을 푸리에 변환하여 피크 주파수를 추출하였으며, 이를 이론적으로 계산한 조우주파수와 비교하였다. 규칙파 중 전진하는 선박의 조우주파수는 아래 식과 같다.

$$w_e = w - \frac{U_0}{g} w^2 \cos \mu
 \tag{5}$$

위의 식에서 w, w_e 는 각각 파도의 원주파수와 조우주파수를, U_0 는 모형선의 예인속도, μ 는 파 입사각, g 는 중력가속도를 의미한다. 단, 파 입사각은 파가 선미로 입사할 경우를 0° 로 하고 반시계방향으로 각도가 증가하여 우현으로 입사할 경우를 90° , 선수로 입사할 경우를 180° 로 정의한다. 파도의 원주파수는 파수(wave number)와 중력가속도 그리고 분산 관계식(dispersion relation)을 이용하면 계산할 수 있다. 이렇게 이론적으로 계산된 모형선의 조우주파수는 4.50rad/s이다.

Fig. 9에 나타난 그래프의 측정된 힘(raw data)에 대한 푸리에 변환 결과는 Fig. 10에 나타나 있으며, 가장 지배적인 주파수인 피크 주파수와 이론적으로 계산한 조우주파수가 유사함을 확인할 수 있다. 또한 두 번째로 지배적인 주파수는 조우주파수의 약 두 배(2차)에 해당하는 주파수인 것을 확인할 수 있으며, 본 시험에서는 일괄적으로 3차까지 피팅을 수행하여 평균력을 도출하였다.

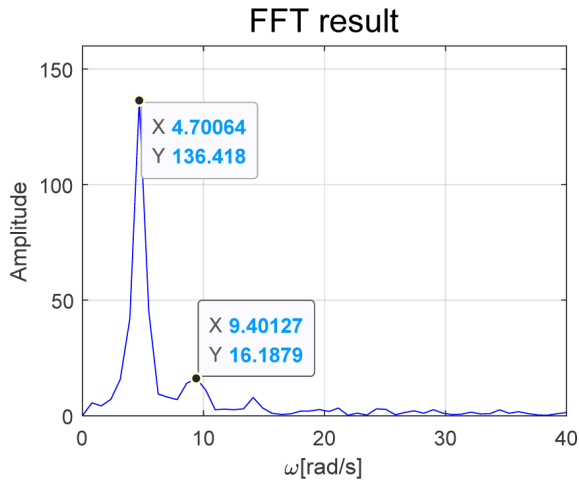


Fig. 10 Frequency domain analysis(FFT result)

Fig. 11에 선수파 및 사향각 0°에 대해서 파장에 따른 선수방향 힘을 나타낸 결과가 실려 있다. 정수 중 계측결과가 포함되어 있으며 파도에 의하여 힘이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 모형선의 6자유도 운동이 고정되어 있는 상태에서 계측된 값이므로 파도에 의한 부가저항과는 차이가 있다. 계측값을 보면 $\lambda/L_{BP} = 0.7$ 에서 파도에 의한 힘이 가장 크게 증가하였고, 1.0, 1.2, 1.5, 0.5 순으로 크기가 나타나고 있다. 전체적으로 파도에 의한 선체길이 방향 힘이 약 20 ~ 25 % 증가한 것을 알 수 있다. 또한 파고 H/L_{BP} 가 0.015로 줄어들 경우 파도에 의한 힘이 감소하는 일반적인 특성을 볼 수 있다.

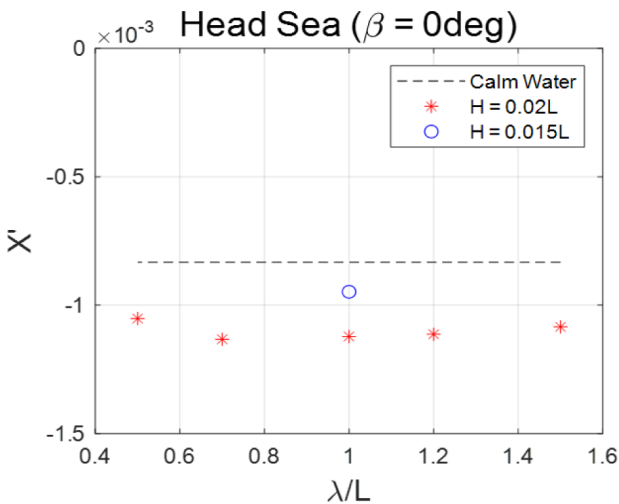


Fig. 11 Captive model test results in head sea condition ($\beta=0^\circ$)

4.2 정적사향 시험결과

4.2.1 정수 중 정적사향 시험결과

정수조건에서 KCS 선형의 정적사향시험이 수행되었다. 시험 결과로부터 사향각에 대한 조종유체력 계수들을 얻을 수 있다. Figs. 12~13에 횡방향 힘과 선수동요 모멘트에 대한 시험결과가

나타나 있으며, 본 시험결과를 기존의 시험결과와 비교하였다. KRISO2019는 본 실험결과이고, KRISO2009는 KRISO의 해양공학연구소에서 수행된 조종시험결과이며 (Kim et al., 2009), NMRI는 SIMMAM 2008에 공개된 모형시험결과이다.

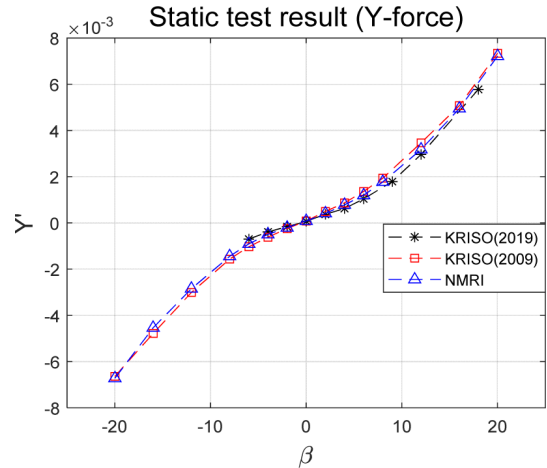


Fig. 12 Static drift test result in calm water (sway force)

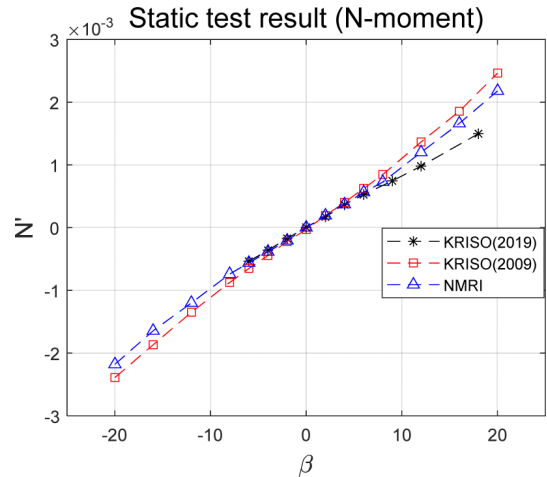


Fig. 13 Static drift test result in calm water (yaw moment)

그림들로부터 작은 사향각 범위에서는 무차원화된 횡방향 힘과 선수동요 모멘트는 기존의 시험결과와 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 9° 이상의 사향각에서는 선수동요 모멘트는 기존의 시험결과와 차이를 보여주고 있으며, 그 이유는 기존의 시험결과가 프로펠러가 설치된 상태에서 수행된 것에 비해 본 시험은 프로펠러가 없는 상태에서 수행된 것에 기인한 것으로 생각된다. 또한 기존의 시험이 상하방향과 종동요 운동이 허용된 상태에서 수행된 것에 비해 본 시험은 6자유도 운동이 고정된 상태에서 수행된 것도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

4.2.2 파도 중 정적사향 시험결과

Table 3의 시험조건에 대해서 파도 중 정적사향시험이 수행되었다. Figs. 14~19에 무차원화된 횡방향 힘과 선수동요 모멘트가 실려 있다. 파고 $H/L_{BP}=0.02$ 조건에서 선수파의 경우는 5개

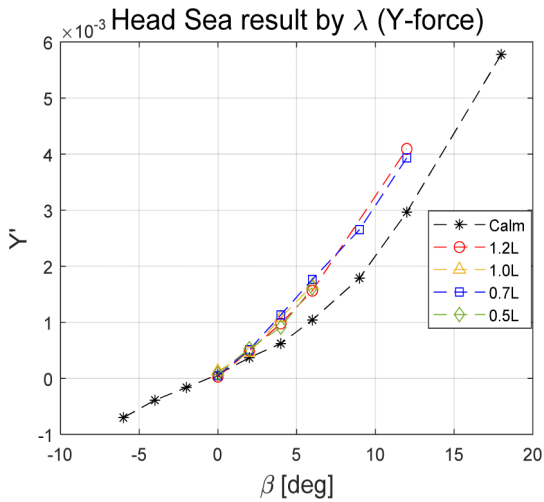


Fig. 14 Static drift test results at head sea (sway force)

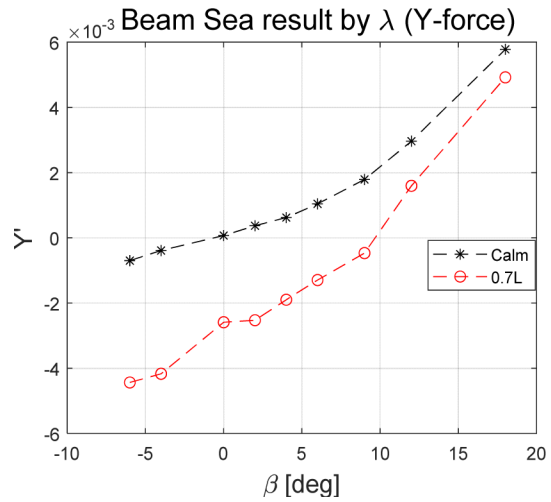


Fig. 16 Static drift test result in beam sea (sway force)

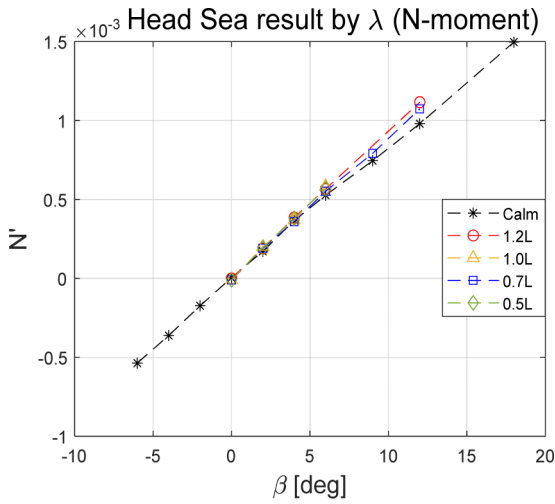


Fig. 15 Static drift test results at head sea (yaw moment)

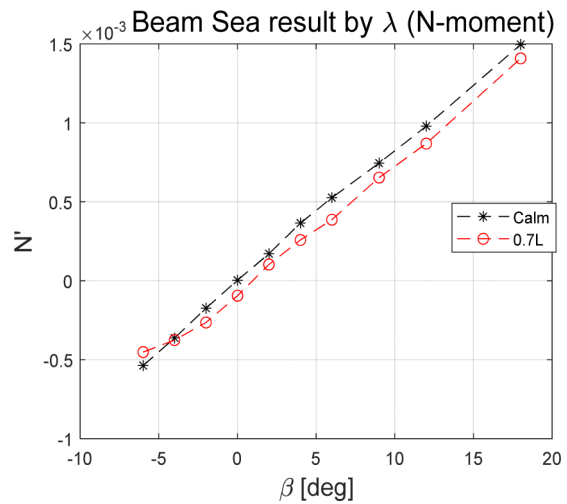


Fig. 17 Static drift test result in beam sea (yaw moment)

의 파장에 대해서, 횡파에 대해서는 1개의 파장에 대한 시험결과가 실려 있으며, 정수 중 시험결과와 비교하였다.

Figs. 14~15에 선수파에 대한 시험결과가 나타나 있으며, 정수 중 결과와 비교하여 나타나 있다. 비교결과로부터 사향각이 증가하면서 파도에 의한 영향이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Figs. 16~17에 횡파에 대한 시험결과가 실려 있다. 횡파 중 시험은 기존에 KRISO에서 수행된 파도 중 자유항주시험(Kim, et. al., 2020) 결과를 참고하여 어느 정도 대표성을 갖고 있다고 판단되는 파장 $\lambda/L_{BP}=0.7$ 조건에 대해서만 수행되었다. 정수 중 결과에 비하여 횡파에 의한 영향이 횡방향 힘과 선수동요 모멘트에 작용하는 것을 볼 수 있다. 하지만 횡파에 의한 선수동요 모멘트에 대한 영향은 횡방향 힘에 비하여 상대적으로 크지 않은 것을 볼 수 있으며, 그 이유는 파 강제력에 의한 횡방향 힘이 선수동요 모멘트에 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단되고, 횡방향 힘의 작용점이 모형선의 무게중심 가까이 존재하기 때문인 것으로 추정된다. 횡파 중 사향시험의 경우 편류각에 대해 좌우 대칭이 아니므로, 추후 더 큰 음수 편류각 시험에 대한 추가적인 시험수행 및 결과 검토가 필요하다.

4.3 동유체력 계수

Figs. 18~20에 사향각 선형구간에 대한 횡방향 힘과 선수동요 모멘트 계측결과를 정리하였다. 그림으로부터 선형계수들을 구할 수 있고, Table 4에 그 계수들을 정리하였다. 다만 Fig. 16에서 횡파 중 횡방향 힘이 (+) 사향각과 (-) 사향각에 대해서 기울기가 다르므로 각각에 대해서 별도로 기울기를 구하였다. 이는 횡파에 의한 영향이 한쪽 방향으로 작용하기 때문에 한쪽 사향각에는 크게 작용하고 반대쪽 사향각에는 작게 작용한 것이 원인으로 추정된다. 본 해석에서는 좌우 비대칭인 횡파에 대해서도 사향각 0도 근처에서 선형계수를 추출했는데, 횡파 중 횡방향 힘의 경우 평형점이 10도 근처이지만 선수동요 모멘트의 경우 평형점이 0도 근처이기 때문이다. 선체가 평균적으로 횡방향으로 힘을 받았지만 선수동요 모멘트는 크게 변화가 없었으므로 편류각 평형점의 원점 이동은 크지 않았으며, 횡파 중 항주 상황에서도 횡방향으로 밀림은 발생하나 편류각은 크지 않을 것으로 예상된다.

Table 4에 정수 및 파도 중 사향각에 대한 선형 미계수를 정리하여 실었다. 그리고 침로안정성을 나타내는 N_v/Y_v 도 같이 정리

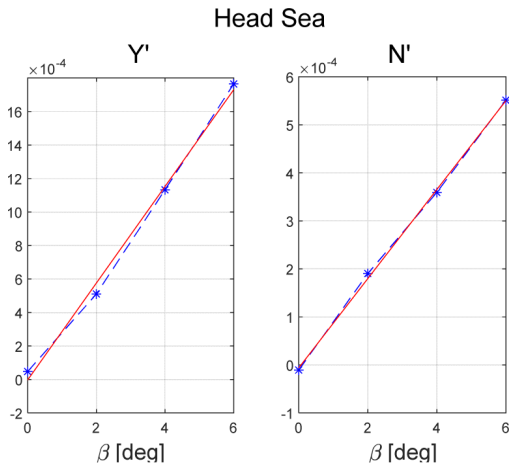


Fig. 18 Static drift test result in head sea (in small angle with linear fitting)

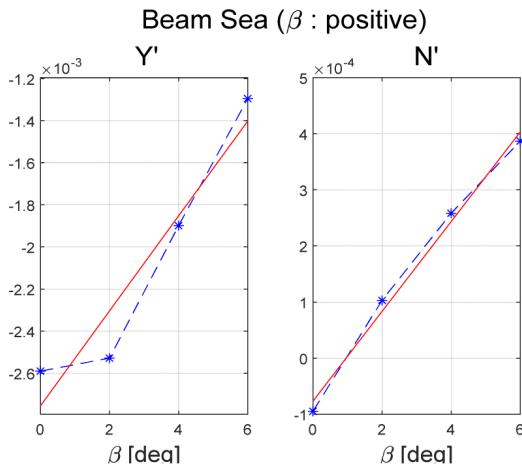


Fig. 19 Static drift test result in beam sea (in small positive angle with linear fitting)

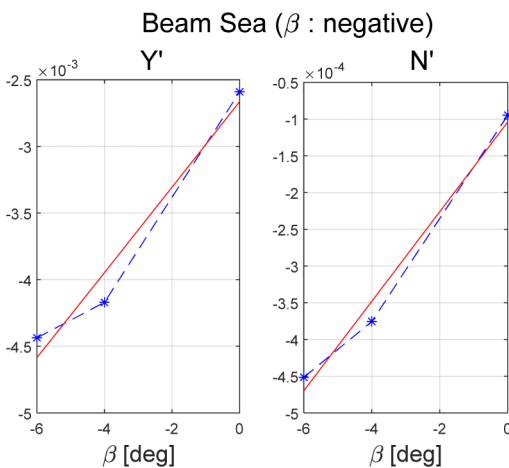


Fig. 20 Static drift test result in beam sea (in small negative angle with linear fitting)

하였다. 본 시험은 6자유도 운동이 구속된 상태에서 정적사향시험이 수행되었으나, 4.2.1절의 정수 중 정적사향 시험결과로부터 사향각 선형구간에 대해서는 종동요와 상하방향 운동이 자유로운

Table 4 Hydrodynamic coefficients

Test	λ/L_{BP}	Y_v	N_v	N_v/Y_v
Calm water	-	-8.931E-3	-5.073E-3	0.568
Head sea ($\chi=180^\circ$)	1.2	-1.139E-2	-5.809E-3	0.510
	1.0	-1.372E-2	-5.738E-3	0.418
	0.7	-1.381E-2	-5.544E-3	0.401
Beam sea ($\chi=90^\circ$)	0.5	-1.367E-2	-5.608E-3	0.410
	0.7 ($\beta=0^\circ\sim 6^\circ$)	-1.298E-2	-4.683E-3	0.361
	0.7 ($\beta=-6^\circ\sim 0^\circ$)	-1.812E-2	-3.453E-3	0.191

기존의 시험결과와 유사한 것을 확인할 수 있었으며, 이에 따라 파도 중 정적사향시험도 사향각 선형구간에 대해서는 유의미한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 사향각에 의한 침로안정성 수치는 그 값이 작을수록 안정적인데, 정리된 결과를 보면 정수상태보다 파도가 있는 경우 더 안정적인 것을 볼 수 있으며 (Yasukawa and Adnan, 2006), 선수파보다 오히려 횡파에서 침로안정성이 더 좋게 추정된 것을 볼 수 있다. 다만 침로안정성을 구성하는 선수동요 각속도에 대한 계수들도 포함해서 해석이 필요하며, 또한 침로안정성의 중요 파향인 선미사파에 대한 연구도 추후에 필요하다.

5. 결론

선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 사향상태에 대한 KCS 선형의 정수 및 파도 중 구속모형시험을 수행하였다. 이를 위하여 2개의 스트럿으로 고정시키는 신규 구속모형 시험장치를 개발하였고, 전체 구속시스템에 대한 교정시험을 수행하는 ‘Single 6x12 방법’을 고안하여 적용하였다. 구속모형시험은 선체와 타만 설치된 상태에서 시험이 수행되었으며, 파도 중 6자유도 운동에 의한 사향각 변화 영향을 배제하기 위해서 6자유도 운동이 고정된 상태에서 시험이 수행되었고, 파도에 의한 평균 유체력을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 직진상태에서 선수파 중 계측된 선체길이방향 힘은 파도의 파장에 따라 정수상태에 비하여 힘이 약 20~25% 증가한 것을 볼 수 있었다.
- 선수파 중 정적사향 시험결과로부터 사향각이 커질수록 파도에 의한 영향이 증가하는 현상을 확인하였다.
- 횡파 중 정적사향 시험결과로부터 횡방향 힘에는 횡파에 의한 영향이 발생하지만, 상대적으로 선수동요 모멘트에는 그 영향이 작은 것을 확인하였다.
- 파도 중 침로안정성을 평균값을 분석한 결과로부터 구한 조종 유체력 미계수를 이용하여 검토하였으며, 정수상태보다

더 안정적인 것을 알 수 있었고, 특히 선수파보다 횡파에서 더 안정적인 것을 알 수 있었다.

파도 중 침로안정성을 상세히 추정하기 위해서는 파도 중 사향각 관련 계수 이외에도 선수동요 각속도 관련 계수들도 필요하며, 또한 파도 중 안정성이 취약한 선미사파와 파도에서의 선박의 상태에 따른 안정성의 변화에 대한 연구도 필요하다. 이러한 연구들은 2세대 복원성과 밀접한 연관이 있으며, 추후 지속적인 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “선박의 조종-운동 통합성능 해석 기술 개발(3/3) (PES3010)”, “수중운동체 운항성능 통합 추정 기술개발(3/5) (PES4250,1525012981)”에 의해 수행되었습니다.

References

- Bailey, P.A., Price, W.G. and Temarel, P., 1997. A Unified mathematical model describing the manoeuvring of a ship travelling in a seaway. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 140, pp.131-149.
- Fang, M.C., Luo, J.H. and Lee, M.L., 2005. A nonlinear mathematical model for ship turning circle simulation in waves. *Journal of Ship Research*, 49(2), pp.69-79.
- IMO MEPC.1/Circ.850/Rev.3, 2021, Guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions.
- Jeon, M.J., Lee, D.H., Nguyen, V.M. and Yoon, H.K., 2015. Estimation of hydrodynamic coefficients in waves using PMM test. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Engineering - Theory and Applications*. Ho Chi Minh City, Vietnam, pp.845-853.
- Kim, D.J., Choi, H., Yun, K., Yeo, D.J. and Kim, Y.G., 2022. Experimental study on turning characteristics of KVLCC2 tanker in long-crested irregular waves. *Ocean Engineering*, 244, pp.1-19.
- Kim, Y.G., Yeo, D.J., Kim, S.Y., Yun, K.H. and Oh, B.I., 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.
- Kim, D.J., Yun, K., Park, J.Y., Yeo, D.J. and Kim, Y.G., 2019. Experimental investigation on turning characteristics of KVLCC2 tanker in regular waves. *Ocean Engineering*, 175, pp.197-206.
- Kim, Y.G., Yeo, D.J., Son, N.S., Kim, S.Y., Yun, K.H. 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.
- Kim, D.J., Yun, K., Yeo, D.J. and Kim, Y.G., 2020. Initial and steady turning characteristics of KCS in regular waves. *Applied Ocean Research*, 105, pp.1-17.
- Lee, S.K., 1992. A study on the memory effect of the radiation forces in the maneuvering motion of a ship. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 29(3), pp.53-58.
- Ottosson, P. and Bystrom, L., 1991. Simulation of the dynamics of a ship maneuvering in waves. *Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 99, pp.281-298.
- Seo, M.G., 2016. Study on prediction method for ship operation performance in waves. *Ph.D. Thesis*. Seoul National University.
- Seo, M.G. and Kim, Y., 2011. Numerical analysis on ship maneuvering coupled with ship motion in waves. *Ocean Engineering*, 38, pp.1934-1945.
- Seo, M.G., Kim, Y. and Kim, K.H., 2011. Effects on nonlinear ship motions on ship maneuvering in large amplitude waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.516-527.
- Seo, M.G., Nam, B.W. and Kim, Y.G., 2018. Numerical Analysis of Turning Performance in Waves by Considering Wave Drift Forces. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(2), pp.103-115.
- SHOPERA, 2016. Presentation of benchmark results. *SHOPERA Benchmark Workshop*, London, 15 April 2016.
- SIMMAN, 2008. *Proceedings of SIMMAN2008*, Vol. 1 and Vol. 2.
- Skejic, R. and Faltinsen, O.M., 2008. A unified seakeeping and maneuvering analysis of ships in regular waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 13, pp.371-394.
- Ueno, M., Nimura, T. and Miyazaki, H., 2003. Experimental study on manoeuvring motion of a ship in waves. *International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*, Japan, pp.1-7.
- Ueno, M., Nimura, T., Miyazaki, H. and Nonaka, K., 2000. Steady wave forces and moment acting on ships in manoeuvring motion in short waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 188, pp.163-172.

Yang, K.K., Kim, Y.C., Kim, K.S. and Yeon, S.M., 2022. Numerical Analysis on Turning and Yaw Checking Avilities 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.

Yasukawa, H., 2006a. Simulations of a ship maneuvering in waves (1st report: turning motion). *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 4, pp.127-136.

Yasukawa, H., 2006b. Simulations of wave-induced motions of a turning ship. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 4, pp.117-126.

Yasukawa, H., Adnan, F.A., 2006. Experimental Study on Wave-Induced Motions and Steady Drift Forces of an Obliquely Moving Ship. *Journal of Society of Naval*

Architects and Ocean Engineering of Japan, No.3, pp.133-138.

