

선박 초기설계단계에서 CFD를 이용한 천수 중 조종성능 추정에 관한 연구

김인태¹ · 김상현^{1,†} · 김현준² · 김동영³ · 양정규⁴

인하대학교 조선해양공학과¹

울산정보산업진흥원²

IHR-Hydroscience and Engineering, The University of Iowa³

방위사업청⁴

A Study on Estimation of Manoeuvring Performance in Shallow Water using CFD in Initial Ship Design Phase

In-Tae Kim¹ · Sang-Hyun Kim^{1,†} · Hyun-Jun Kim² · Dong-Young Kim³ · Jung-Kyu Yang⁴

Inha University, Naval Architecture Ocean Engineering¹

Ulsan ICT Promotion Agency²

IHR-Hydroscience and Engineering, The University of Iowa³

Defense Acquisition Program Administration⁴

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.

Analysis of ship's manoeuvrability in shallow water is an important task from the perspective of the vessels' navigational safety. Since the number of ships operated in restricted water has increased due to the enlargement of vessels and ships represent different characteristics of the manoeuvrability when operated in shallow and deep water, it is significant to evaluate ship manoeuvrability at initial design stage. At the initial stage of design, the estimation of manoeuvrability is generally performed with hydrodynamic coefficients estimated based on empirical formula. However, the accuracy of estimating hydrodynamic coefficients by the empirical formula in shallow water is poor compared to that in deep water. Therefore, the error in the estimation of manoeuvrability increases in shallow water. In this study, CFD is proposed to improve the accuracy of manoeuvrability in shallow water at the initial design stage and hydrodynamic coefficients were obtained based on PMM test in shallow water. Furthermore, the ship manoeuvrability was estimated both the proposed strategy and the empirical formula. At last, validity of the proposed strategy using CFD for the estimation of manoeuvrability was confirmed by comparison with the manoeuvrability estimation results from model test.

Keywords : Manoeuvrability(조종성능), Shallow water(천수영역), CFD(전산유체역학), PMM test(PMM 시험)

1. 서론

최근 선박의 좌초 및 충돌 사고로 인하여 발생하는 해양오염문제에 대한 관심이 커짐에 따라 선박의 조종성능에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히, 선박의 대형화에 따라 천수를 운항하는 선박이 증가하고, 전체 사고의 1/3 이상이 얕은 수심에서 발생하기에 천수 중 조종성능의 평가는 더욱 중요해 지고 있다 (Jebsen & Papakonstantinou, 1997). 특히 천수를 운항하는 선박의 경우 심

수를 운항하는 선박과 다른 조종특성이 발생하고, 특히 천수 영역인 운하, 수로 등을 운항하는 선박의 경우 침로 안정성의 추정이 중요하다.

천수 영역 조종성능 추정은 일반적으로 조종유체력 미계수를 이용하여 간접적으로 추정하게 된다. 천수 영역 조종 유체력 미계수 추정 시에는 일반적으로 구속모형 시험, 경험식, CFD 등을 이용한다. 구속모형 시험은 정도 높은 유체력 미계수 추정이 가능하지만 천수 조건을 구현 가능한 수조를 필요로 한다. 하지만, 현재 많은 연구기관에서 천수 영역 구현이 가능한 수조를 보유하

고 있지는 못한 실정이다. 경험식은 미계수 추정에 소요되는 시간이 적지만 천수에서의 추정에 대한 신뢰도가 낮은 것이 단점이다. CFD는 천수 조건과 영향을 계산영역과 조건의 변경을 통하여 계산이 가능하지만 아직 계산 절차에 대하여 논의 중이고, 사용자에 따라 도출되는 결과가 상이 할 수 있어 모형 시험이 아직 필요한 실정이다

천수에서의 조종성능 추정에 관한 연구로 Yoshimura (1988), Kim et al. (2008), Yun et al. (2014)의 연구 등이 있다. Yoshimura (1988)는 PCC선형에 대한 모델 테스트를 수행 후 저속, 천수에서의 조종성능을 추정하였고, Kim et al. (2008)은 주요제원을 이용하여 저속 천수에서의 조종성능을 추정할 수 있도록 조종 운동 방정식을 제안하였다. Yun et al. (2014)는 천수에서 운항속도, 사향각에 따른 자세 변화 및 압력 변화를 실험 및 CFD를 이용하여 확인하였다. 또한, 천수 중 경험식을 통한 유체력 미계수 추정에 관한 연구에는 Sheng (1981) 과 Ankininov (1990)의 연구가 있으며, 섭동 모델에 적합한 조종성 계수의 경험식을 제안한 바 있다. 또한 Kijima et al. (1990) 와 Kobayashi et al. (1995)는 MMG 모델에 적합한 조종성 계수 경험식을 제안한 바 있다. 그러나 천수 중 유체력 미계수 추정 오차에 대한 고찰과 이를 보완하기 위한 연구는 많이 수행되지 않은 실정이다.

본 연구는 선박 초기설계단계에서 천수 중 조종성능 추정정도 향상을 위하여 CFD 계산 결과를 이용하는 방법을 제안하고자 한다. 다만 CFD를 이용하여 전체 미계수를 도출하는 방법은 초기 설계단계에 사용하기에는 시간적인 제약이 존재하기에, 경험식으로 도출된 미계수 중 추정정도가 낮은 미계수만을 CFD를 이용하여 도출하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 흘수 대 수심비 1.5, 1.2에서 CFD를 이용하여 가상 구속모형시험을 수행하여 알몸선체에 작용하는 유체력 계산 및 유체력 미계수를 도출하였고, 그 결과를 Kijima et al. (1990)의 천수 중 유체력 미계수 추정 경험식 결과와 비교하였다.

또한 제안한 방법의 유효성을 확인하기 위하여 조종운동 시뮬레이션 모델을 구성하고, 제안한 방법, 경험식으로 도출된 미계수, 모형시험으로 도출된 미계수를 이용한 조종운동 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

2. 조종운동 방정식

2.1 좌표계

본 논문에서 사용된 좌표계는 Fig. 1과 같이 지구고정좌표계와 선체고정좌표계를 사용하였다. 선체고정좌표계의 x, y 축의 원점은 선체 중앙부로 취하고 선박의 선수방향을 x축, 정횡우현 방향을 y축, 선저 방향을 z축의 양(+)의 방향으로 정의하고, 공간 좌표계는 선박의 초기 진행방향을 X 방향으로 정의하였다 (Kim, et al., 2016).

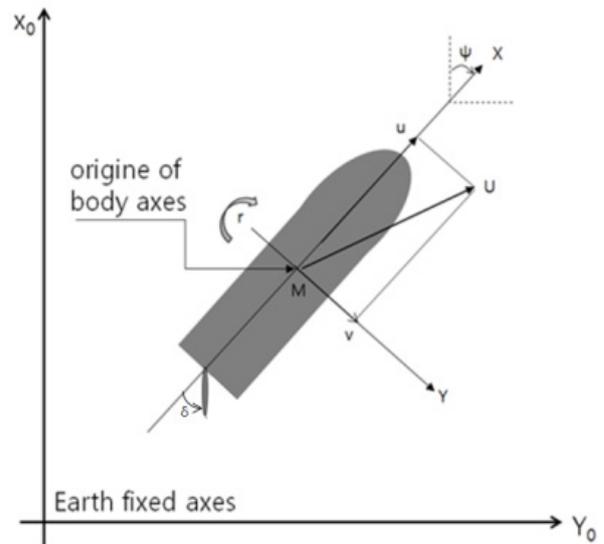


Fig. 1 Coordinates system

2.2 조종운동 방정식 및 선체 유체력

본 논문에서 사용된 운동방정식은 식 (1)과 같이 전후동요 (surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)의 3자유도로 나타내어 표현한다.

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

선체와 프로펠러, 러더에 작용하는 유체력을 분리하여 고려하는 MMG 수학모델을 사용하였다 (Matsumoto & Suemitsu, 1983; ITTC, 2008). 또한 선체에 작용하는 유체력은 식 (2)와 같이 표현하였고, 식 (3)과 같이 밀도, 수선간길이, 흘수, 전진속도를 이용하여 무차원화 된다.

$$\begin{aligned}
 X_H' &= X_u'u' + X_{vv}v'^2 + X_{vr}v'r' + X_{rr}r'^2 + X(u)' \\
 Y_H' &= Y_v'v' + Y_r'r' + Y_v'v' + Y_{vv}v'^3 + Y_r'r' \\
 &\quad + Y_{rrr}r'^3 + Y_{vrr}v'r'^2 + Y_{vvr}v'^2r'
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 N_H' &= N_v'v' + N_r'r' + N_v'v' + N_{vv}v'^3 + N_r'r' \\
 &\quad + N_{rrr}r'^3 + N_{vrr}v'r'^2 + Y_{vvr}v'^2r' \\
 X' &= X/0.5 \rho L_{pp} TU^2 \\
 Y' &= Y/0.5 \rho L_{pp} TU^2 \\
 N' &= N/0.5 \rho L_{pp}^2 TU^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

3. 가상구속모형시험 조건

3.1 대상 선형

천수 중 구속모형시험으로 도출된 미계수 값이 공개되어 있어 비교가 가능한 KVLCC2 (SIMMAN, 2008)를 대상 선형으로 선정하여 선체 단독에 대하여 1:58 스케일로 수치계산을 수행하였다. 모형선의 주요 제원은 Table 1에 나타나 있으며, 천수 중 운항속도는 SIMMAN 2014에서 제시한 실선기준 7 knots로 결정하였다.

Table 1 Principal particulars of KVLCC2 model ship

Item	Value
Scale ratio	58
L_{pp}	5.5172 m
Breath	1 m
Draft	0.3586 m
Displacement	1.6023 m ³
Vertical center of gravity	0.3206m (from bottom)
Froude number	Deep water : 0.142 Shallow water : 0.064

3.2 가상 구속모형시험 조건

상용 수치해석 프로그램으로 RANS(Reynolds Average Navier-Stokes) 기반 수치해석 프로그램인 STAR-CCM+를 사용하였으며, STAR-CCM+에서 제공하는 DFBI(Dynamic Fluid Body Interaction) 및 중첩격자기법을 활용하여 가상 구속모형시험 구현하여 계산을 수행하였다. 대상선의 동적 자세 변화를 계산하기 위하여 DFBI 기법을 사용하였고, 천수역에서의 자세 변화를 계산하기 위하여는 선체의 동적 자세변화와 별도로 천수의 영향에 따른 선체의 자세변화가 고려되어야 하는데 DFBI 기법만을 적용한 가상 구속모형시험은 운항조건에 따른 경계조건을 지정할 수 없는 제약조건을 가진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선체의 자세변화가 계산영역과 별도로 거동하도록 Overset mesh 기법을 적용하였다 (Kim et al., 2016).

KVLCC2 선형의 격자와 계산 조건은 Fig. 2, Table 2와 같으며, 천수 동요 속도(r')는 식 (4)를 이용하여 무차원화 하였다. CFD 계산에 사용된 경계 조건은 Table 3과 같다. 선체 표면 및 공간 격자는 STAR-CCM+에서 제공하는 Trimmed mesh 와 Prism layer를 사용하여 $y^+ = 40\sim70$ 범위를 만족시켰다. 생성된 전체 격자수는 100~150만개이고 선체 주위와 자유수면 주위에 격자를 집중 시켰다 (Kim, 2017).



Fig. 2 Numerical grid employed for calculation

Table 2 Test condition

Types	Conditions
Static drift test	Drift angle(β) 3°, 6°, 9°, 12°, 16°, 20°, 25°
Pure yaw test	Yaw velocity(r') 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6

$$r' = \frac{r}{U/L} \quad (4)$$

Table 3 Boundary condition

	Boundary condition
Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Side	Velocity inlet
Top	Velocity inlet
KVLCC2	Wall
Bottom	Deep water : Velocity inlet Shallow water : Wall

수치 시뮬레이션으로 구현한 구속모형시험에 대한 계산 영역은 선체 중심에서부터 선수부 방향으로 1.5 L_{pp} , 선미부 방향으로 2.0 L_{pp} , 폭 방향으로 1.5 L_{pp} 로 지정하였다. 공기에 해당하는 영역의 높이는 0.5 L_{pp} 이다 (ITTC, 2011). 계산 영역의 바닥면은 심수의 경우 1.5 L_{pp} , 천수의 경우 수심과 흘수 비 (h/T) 1.5, 1.2를 맞추어 결정하였다.

4. 가상구속모형시험 결과

4.1 심수 중 가상구속모형시험

천수 중 가상구속모형시험을 수행하기에 앞서 가상구속모형시

험의 검증을 위하여 심수 중 가상구속모형시험을 수행하여 모형 시험 결과와 비교하였다. CFD는 가상구속모형시험을 이용하여 계산된 결과이고, EFD는 구속모형시험으로 도출된 결과이다.

4.1.1 정적 편류각 시험

1:58 스케일의 모형선에 대하여 선체 단독에 대하여 수행된 Sung et al. (2015)의 연구와 1:110 스케일 모형선에 대하여 프로펠러와 러더를 부착하여 수행된 Yasukawa et al. (2014)의 모형시험 결과와 비교하였다.

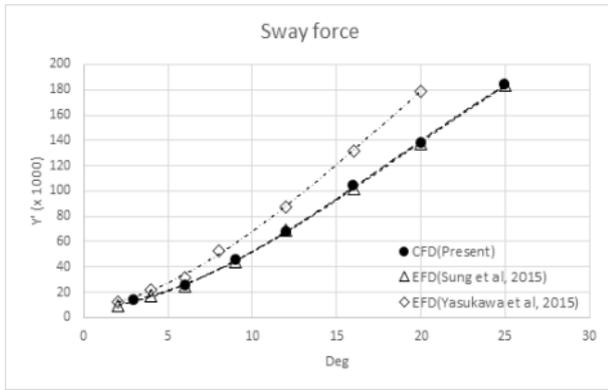


Fig. 3 Non-dimensional sway force for static drift test

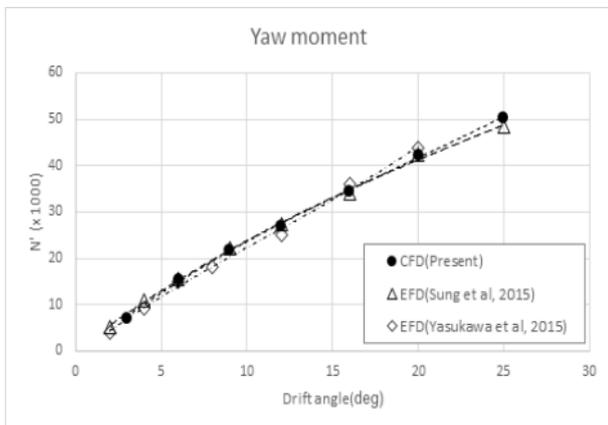


Fig. 4 Non-dimensional yaw moment for static drift test

Fig. 3과 4는 정적 편류각 시험을 통하여 구해진 힘과 모멘트를 편류각 별로 비교한 결과이다. Sung et al. (2015)의 모형시험 결과와 CFD의 결과는 유사한 결과를 보이나, Yasukawa et al. (2014)의 모형시험과는 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 모형선의 크기와 부가물의 유무로 인하여 발생하는 차이로 판단된다. Table 4는 가상구속모형시험을 통하여 도출한 유체력 미계수와 Sung et al. (2015)의 연구에 공개된 미계수, Yasukawa et al. (2014)의 모형시험 결과로 도출된 미계수의 비교이다. 오차는 각각의 모형시험 결과 대비 CFD 결과의 비교이다.

Table 4 Computed and experimental values of hydrodynamic derivatives (static drift test)

Derivatives	CFD	EFD (Sung)	Error	EFD (Yasukawa)	Error
Y'_v	-0.2945	-0.2997	1.7%	-0.3425	12.5%
Y'_{vvv}	-0.8320	-0.8185	1.6%	-1.6060	49.0%
N'_v	-0.1361	-0.1355	0.4%	-0.1454	6.8%
N'_{vvv}	0.0990	0.0917	8.0%	0.1660	44.8%

Sung et al. (2015)의 모형시험 결과와 비교하였을 시 선형 유체력 미계수인 Y'_v, N'_v 와 비선형 유체력 미계수 Y'_{vvv} 의 경우 2% 이내의 오차가 발생하였다. 비선형 유체력 미계수 N'_{vvv} 의 경우 오차가 8% 발생하였는데, 그 원인은 25°에서 CFD와 EFD의 모멘트 차이가 약 4% 발생하였고 이로 인한 오차 증가로 판단된다.

Yasukawa et al. (2014)의 모형시험과 비교하였을 시 Sung et al. (2014)의 모형시험에 비하여 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 모형선 스케일의 차이, 부가물의 유무, 정적 편류각 시험의 범위차이로 인하여 발생한 오차로 판단된다.

4.1.2 순수 선수 동요 시험

1:58 스케일의 모형선에 대하여 선체 단독에 대하여 수행된 Sung et al. (2015)의 연구의 모형시험 결과와 비교하였다. Yasukawa et al. (2014)의 연구에서는 공개된 시험 결과가 없어 비교하지 않았다.

Fig. 5와 6은 CFD와 Sung et al. (2015)의 연구에서 순수 선수 동요 시험을 통하여 구해진 힘과 모멘트를 푸리에 변환을 통하여 구해진 반위상에 해당하는 힘과 모멘트를 무차원화 된 각속도 별로 비교한 결과이다. 모형시험에 비하여 평균적으로 힘은 6.5%, 모멘트는 5.9%의 오차가 발생하였지만 전체적인 경향은 유사하게 도출되는 것을 확인 할 수 있다. Table 5는 순수 선수 동요 시험 결과를 이용하여 도출한 유체력 미계수와 Sung et al. (2015)에 공개된 모형 시험으로 도출된 미계수와의 비교이다.

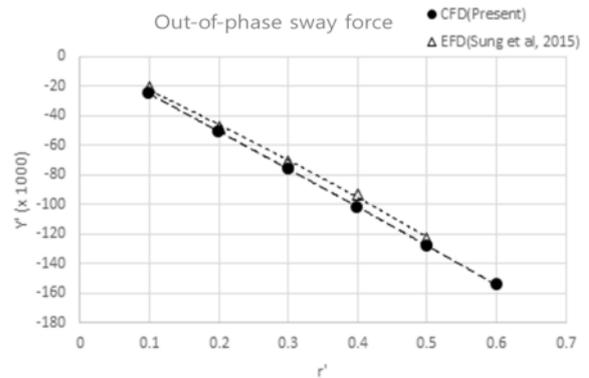


Fig. 5 Non-dimensional out of phase sway force for pure yaw test

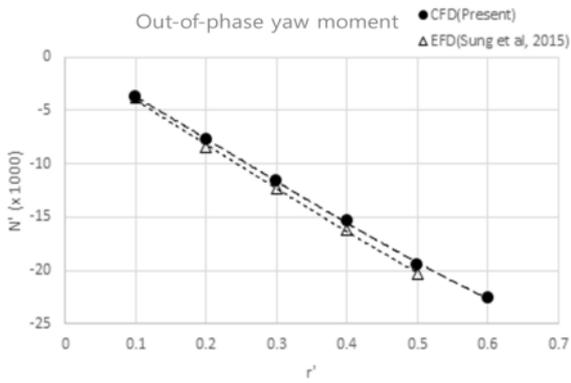


Fig. 6 Non-dimensional out of phase yaw moment for pure yaw test

Table 5 Computed and experimental values of hydrodynamic derivatives (pure yaw test)

Derivatives	CFD	EFD (Sung et al.)	Error
$Y_r' - m'$	-0.2522	-0.2436	3.6%
Y_{rrr}'	-0.0145	-0.0160	9.4%
N_r'	-0.0407	-0.0439	8.3%
N_{rrr}'	0.0042	0.0118	64.4%

선형 유체력 미계수인 $Y_v' - m'$, N_r' 의 경우 각각 3.6%와 8.3%의 오차를 보였고, 비선형 유체력 미계수 Y_{rrr}' 은 9.4%의 오차를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 비선형 유체력 미계수 N_{rrr}' 의 경우 비교적 오차가 크게 발생하였고, 이에 대한 원인은 N_{rrr}' 미계수 값이 작아서 절대적인 값의 차이는 적으나 상대적인 오차가 크게 나타난 것으로 판단하였다. 또한 선행연구를 통하여 비선형 유체력 미계수가 선형 유체력 미계수에 비하여 조종성능 평가에 미치는 영향이 작기에 그 오차를 무시 할 수 있음을 확인하였다 (Kim et al., 2016).

4.2 천수 중 가상구속모형시험

4.2.1. 정적 편류각 시험

Fig. 7, 8에서는 정적 편류각 시험에 대하여 $h/T=1.5, 1.2$ 에서 본 연구에서 수행한 CFD 결과와 Yasuakwa et al. (2014)에서 수행한 모형시험의 편류각 별 힘과 모멘트를 보여주고 있다.

Table 6, 7에서는 계산된 유체력으로 도출된 유체력 미계수를 나타내고 있다.

Yasukawa et al. (2014)의 모형시험 결과와 CFD 계산 결과를 비교하였을 시 CFD로 도출된 결과가 모형시험 결과보다 전체적으로 크게 나타나는 경향을 보였다. 그 원인으로는 부가물과 모델 스케일 차이에서 발생하는 축척효과 영향으로 판단된다.

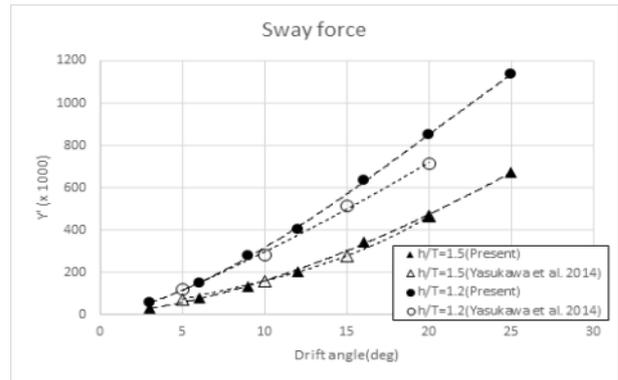


Fig. 7 Non-dimensional sway force for static drift test

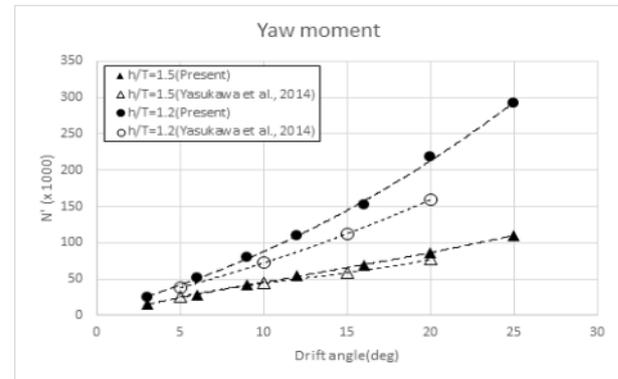


Fig. 8 Non-dimensional yaw moment for static drift test

Table 6 Hydrodynamic derivatives estimated from static drift test($h/T=1.5$)

$h/T=1.5$	CFD	EFD (Yasukawa et al.)	Error
Y_v'	-0.835	-0.678	23.2%
Y_{vvv}'	-4.365	-5.306	17.7%
N_v'	-0.286	-0.256	11.7%
N_{vvv}'	-0.158	0.204	177%

Table 7 Hydrodynamic derivatives estimated from static drift test($h/T=1.2$)

$h/T=1.2$	CFD	EFD (Yasukawa et al.)	Error
Y_v'	-1.744	-1.550	12.5%
Y_{vvv}'	-5.590	-6.638	15.8%
N_v'	-0.473	-0.380	24.4%
N_{vvv}'	-1.250	-0.634	97.1%

4.2.2 순수 선수 동요 시험

Fig. 9와 10에서는 $h/T=1.5, 1.2$ 에서 가상구속모형시험을 이용하여 수행된 순수 선수 동요 시험을 통하여 구해진 힘과 모멘트를 푸리에 변환을 통하여 반위상에 해당하는 힘과 모멘트를 무차원화 된 각속도 별로 비교한 결과이다. 공개된 모형시험 결과가 없어 모형시험 결과와 비교하지 않았다.

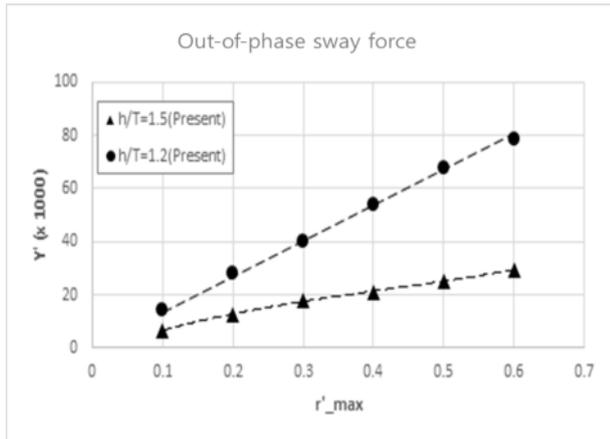


Fig. 9 Non-dimensional out of phase sway force for pure yaw test

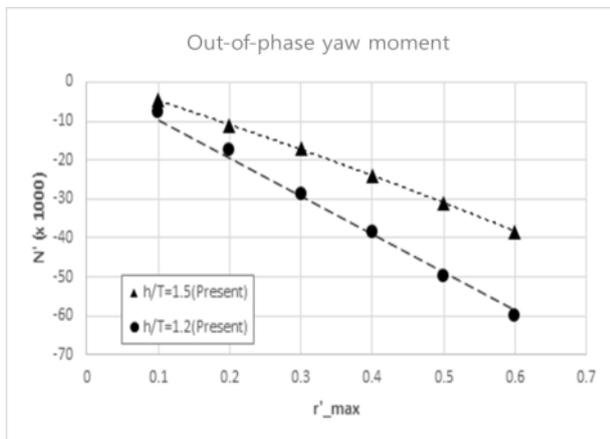


Fig. 10 Non-dimensional out of phase yaw moment for pure yaw test

Table 8에서는 계산된 유체력으로 도출된 유체력 미계수를 나타내고 있다.

Table 8 Hydrodynamic derivatives estimated from pure yaw test

	$Y'_r - m'$	Y'_{rr}	N'_r	N'_{rr}
$h/T = 1.5$	-0.2395	-0.0154	-0.0547	-0.0265
$h/T = 1.2$	-0.1544	-0.0212	-0.0910	-0.0281

4.3 고찰

4.3.1 수심변화에 따른 동압력 및 자세변화 비교

Table 9, 10, 11, 12에서 $h/T=1.5, 1.2$ 두 가지 수심에서 정적 편류각 시험 중 편류각(β) $3^\circ, 9^\circ, 16^\circ, 25^\circ$ 에서 선측면과 선저면에 작용하는 동압력을 비교해 보았다. 얕은 수심에서 압력 감소가 더 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있고, 그 영향은 특히 선미부에 비하여 선수부에 더 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다 (Yun et al., 2014).

Table 9 Pressure distribution of drift angle 3°

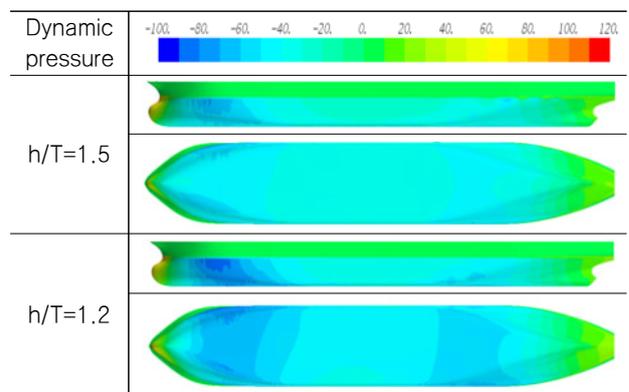


Table 10 Pressure distribution of drift angle 9°

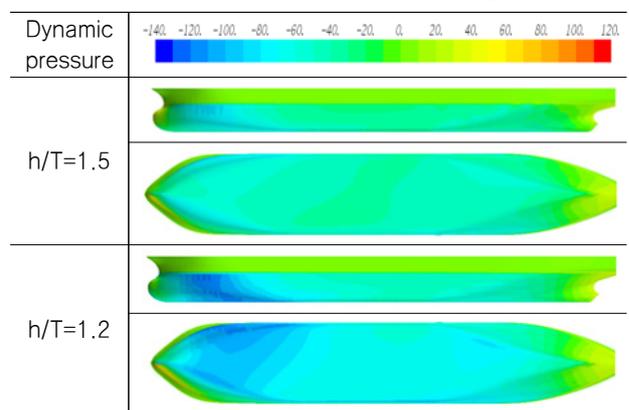


Table 11 Pressure distribution of drift angle 16°

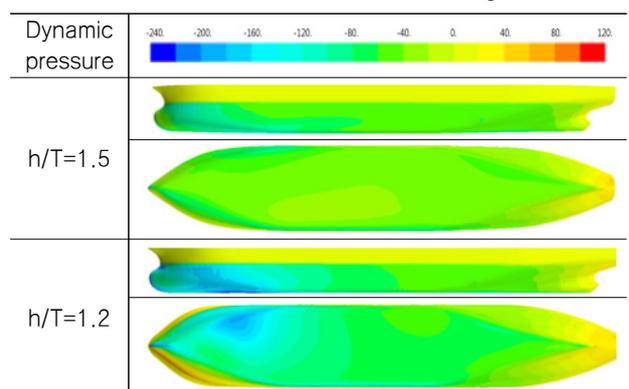


Table 12 Pressure distribution of drift angle 25°

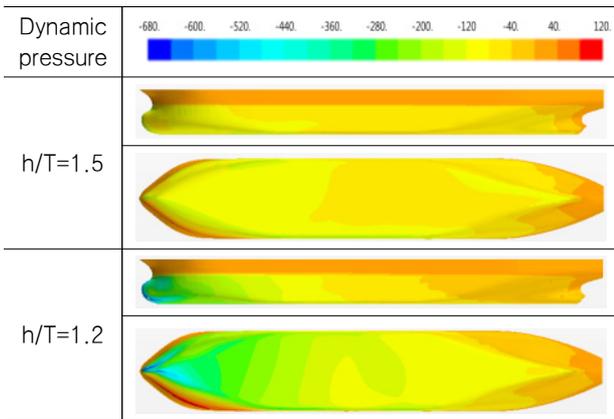


Fig. 11, 12는 h/T=1.5 1.2에서 편류각에 따른 선수트림과 침하량 변화를 보여주고 있다. 앞은 수심에서 침하량과 선수 트림이 증가하였고, 편류각이 커질수록 그 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

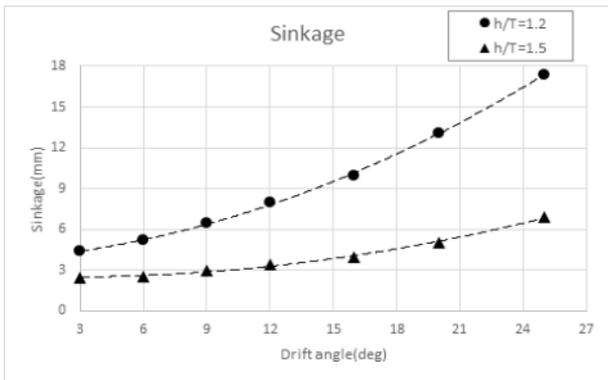


Fig. 11 Comparison of sinkage (h/T=1.5, h/T=1.2)

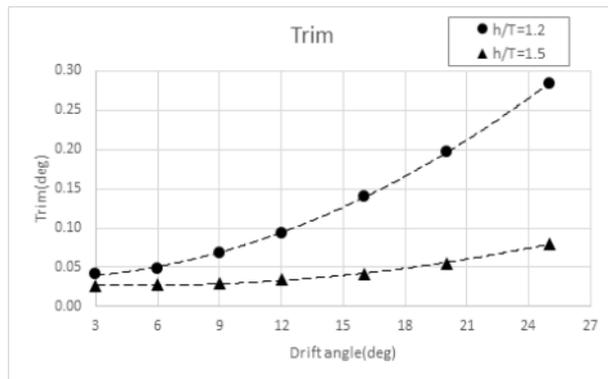


Fig. 12 Comparison of trim (h/T=1.5, h/T=1.2)

4.3.2 추정 경험식과 CFD 계산 결과 비교

h/T=1.5, 1.2 두 가지 수심에서 가상 구속모형시험으로 도출된 미계수와 ITTC 23rd Proceeding(2002)에 제시된 Kijima et al.

(1990)의 천수 중 미계수 추정경험식으로 얻어진 선형 미계수를 Yasukawa et al. (2014)의 논문에서 공개된 모형시험 결과와 Table 13, 14에서 비교하였다. 식 (5)는 ITTC 23rd Proceeding (2002)에 제시된 Kijima et al. (1990)의 천수 중 미계수 추정 경험식이다.

$$D_{shallow} = f\left(\frac{T}{h}\right)D_{deep} \tag{5}$$

$$D: Y_v', N_v', N_r'$$

$$f\left(\frac{T}{h}\right) = \frac{1}{\left(1 - \frac{T}{h}\right)^n} - \frac{T}{h}$$

$$D = Y_v' \Rightarrow n = 0.40 C_B \frac{B}{T}$$

$$D = N_v' \Rightarrow n = 0.425 C_B \frac{B}{T}$$

$$D = N_r' \Rightarrow n = -7.14k + 1.5$$

$$k = 2T/L$$

$$D: Y_r'$$

$$f\left(\frac{T}{h}\right) = 1 + a_1\left(\frac{T}{h}\right) + a_2\left(\frac{T}{h}\right)^2 + a_3\left(\frac{T}{h}\right)^3$$

$$D = Y_r' - (m' - X_u')$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a_1 = -5.5\left(C_B \frac{B}{T}\right)^2 + 26 C_B \frac{B}{T} - 31.5 \\ a_2 = 37\left(C_B \frac{B}{T}\right)^2 - 185 C_B \frac{B}{T} + 230 \\ a_3 = -38\left(C_B \frac{B}{T}\right)^2 + 197 C_B \frac{B}{T} - 250 \end{cases}$$

Table 13 Comparison of hydrodynamic derivatives (h/T=1.5)

h/T=1.5	EFD	EMP	Error	CFD	Error
Y_v'	-0.678	-0.640	6%	-0.835	23%
N_v'	-0.256	-0.302	18%	-0.286	12%
Y_r'	0.185	0.062	66%	0.054	71%
N_r'	-0.065	-0.059	9%	-0.055	15%

Table 14 Comparison of hydrodynamic derivatives (h/T=1.2)

h/T=1.2	EFD	EMP	Error	CFD	Error
Y_v'	-1.550	-1.327	14%	-1.744	13%
N_v'	-0.380	-0.651	71%	-0.473	24%
Y_r'	0.317	-0.020	106%	0.139	56%
N_r'	-0.122	-0.096	21%	-0.091	25%

모형시험 결과 대비 $h/T=1.5$ 보다 $h/T=1.2$ 에서 CFD의 오차는 더 크게 나타났으나, 경험식과 비교하였을 시, $h/T=1.5$ 보다 $h/T=1.2$ 에서 CFD를 이용한 미계수 추정치 경험식보다 유리함을 확인 할 수 있고, 그 중 N_v', Y_r' 의 추정정도가 경험식에 비하여 CFD 계산이 높은 것을 확인 할 수 있다. 이는 N_v', Y_r' 은 선수, 선미에 작용하는 유체력 차이가 고려되어야 하는 미계수이고, 수심이 얕아질수록 자세변화의 증가로 인하여 선수, 선미에 작용한 유체력 차이가 증가하였고, Kijima의 추정경험식의 경우 그 영향을 충분히 고려하지 못하여 추정 정도가 낮아지는 것으로 판단된다.

5. 천수 중 조종운동 시뮬레이션

5.1 조종운동 시뮬레이션

선박 초기설계단계에서 CFD를 이용한 천수 중 조종성능 추정 정도 향상을 위하여 천수 중 추정정도가 낮은 미계수를 CFD 계산 결과를 이용하여 조종성능 추정정도를 향상 시키는 방안을 제안하였다. 제안한 방법의 검증을 위하여 Yasukawa et al. (2014)의 연구에서 공개된 미계수를 이용하여 Table 15와 같이 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과와 조종성능 평가에 영향이 크다고 알려진 Y_v', N_v', Y_r', N_r' 에 대하여 Table 16과 같이 미계수를 변경하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 비교하였다.

Table 15 Simulation for maneuverability verification

Article	Simulation	Evaluation factor
Course stability	10°/ 10° zigzag simulation	1st, 2nd overshoot angle
Turning ability	35°turning simulation	Advance, tactical diameter

Table 16 Hydrodynamic derivatives cases for simulations (Y_v', N_v', Y_r', N_r')

Case	Model test	CFD	EMP	Note
Case 1 (Model test)	○	×	×	
Case 2 (CFD)	×	○	×	
Case 3 (EMP)	×	×	○	
Case 4 (CFD+EMP)	×	△	△	CFD : Y_r', N_v' EMP : Y_v', N_r'

Y_v', N_v', Y_r', N_r' 에 대하여 Case 1은 Yasukawa et al.

(2014) 연구에 공개된 모형시험을 이용하여 도출된 미계수 값을 사용하였고 미계수 도출에 사용한 모형시험은 정적 편류각 시험, 원호운동시험(Circular motion test)이다. Case 2는 가상구속모형 시험으로 도출된 미계수, Case3은 Kijima et al. (1990)의 추정 경험식을 이용하여 도출한 미계수를 사용하여 시뮬레이션 한 결과이다. Case4는 선형 유체력 미계수 중 경험식의 오차가 큰 Y_r', N_v' 만을 CFD도 도출된 미계수를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 선형 유체력 미계수를 제외한 비선형 유체력 미계수, 프로펠러, 타 관련 계수는 Yasukawa et al. (2014)의 연구에서 공개된 값을 사용하였다.

5.2 조종운동 시뮬레이션 결과

5.2.1 침로안정 성능

미계수 추정방법에 따른 침로안정성 추정 정도 차이를 비교하기 위하여 10°/10° 지그재그 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 13, Table 17은 $h/T=1.5$ 에서의 미계수 추정방법에 따른 시뮬레이션 궤적과 첫 번째, 두 번째 오버슈트 각을, Fig. 14와 Table 18은 $h/T=1.2$ 에서의 결과를 보여주고 있다.

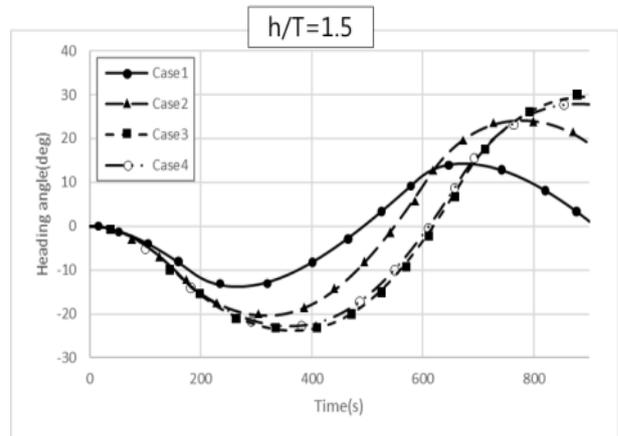


Fig. 13 Comparison of time histories of heading angle in 10°/10° zigzag simulation ($h/T=1.5$)

Table 17 Comparisons of 1st and 2nd overshoot angle ($h/T=1.5$)

$h/T=1.5$	1st overshoot angle	2nd overshoot angle
Case 1	3.7°	4.3°
Case 2	10.4°	14.0°
Case 3	13.8°	19.5°
Case 4	12.8°	6.0°

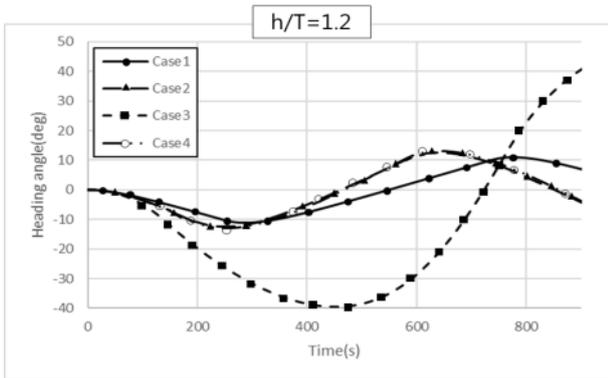


Fig. 14 Comparison of time histories of heading angle in 10°/10° zigzag simulation(h/T=1.2)

Table 18 Comparisons of 1st and 2nd overshoot angle(h/T=1.2)

h/T=1.2	1st overshoot angle	2nd overshoot angle
Case 1	1.1°	1.1°
Case 2	2.5°	2.6°
Case 3	29.5°	35.6°
Case 4	2.9°	3.1°

Case 1과 비교하였을 시, CFD로 도출된 미계수를 사용한 Case 2, Case 4가 경험식으로 도출한 미계수를 사용한 Case 3에 비하여 근접한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 그 차이는 h/T=1.5에 비하여 h/T=1.2에서 크게 나타난다. 이는 h/T=1.5에 비하여 h/T=1.2에서의 N_v' , Y_r' 유체력 미계수의 추정 정도가 추정경험식에 비하여 CFD가 높기 때문인 것으로 판단된다.

5.2.2 선회 성능

미계수 추정방법에 따른 선회성능 추정 정도 차이를 비교하기 위하여 35° 선회 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 15, Table 19는 h/T=1.5에서의 미계수 추정방법에 따른 시뮬레이션 궤적과 전진 거리와 전술선회반경을, Fig. 16과 Table 20은 h/T=1.2에서의 결과를 보여주고 있다.

h/T=1.5에서는 Case 1과 비교하였을 시 Case 2, Case 3, Case 4의 추정 정도가 비슷한 것을 확인할 수 있으나 h/T=1.2에서는 Case 3, 4의 추정정도가 Case 2의 추정정도에 비하여 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 h/T=1.5에 비하여 h/T=1.2에서의 N_v' , Y_r' 유체력 미계수의 추정 정도가 추정경험식에 비하여 CFD가 높기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 경험식으로 도출된 미계수를 이용하여 선회 시뮬레이션 수행 시, 수심이 얕아질수록 선회 반경이 줄어드는 원인으로는 경험식으로 도출된 Y_r' 의 경향성의 차이로 판단된다. 경험식으로 도출된 Y_r' 경우 수심이 얕아질수록 작아지는데, 이는 모형

시험 및 CFD 결과와 상반되는 경향을 나타내고 있어 이로 인하여 수심이 얕아질수록 선회반경이 감소하는 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 프로펠러 및 타 관련 계수가 천수 중에서의 선체, 타 및 프로펠러의 상호간섭 효과를 충분히 표현하고 있지 못한 것도 원인으로 생각된다. 천수 중에서의 조종성능 평가 정도 향상을 위한 추가적인 연구가 향후 필요할 것으로 판단된다.

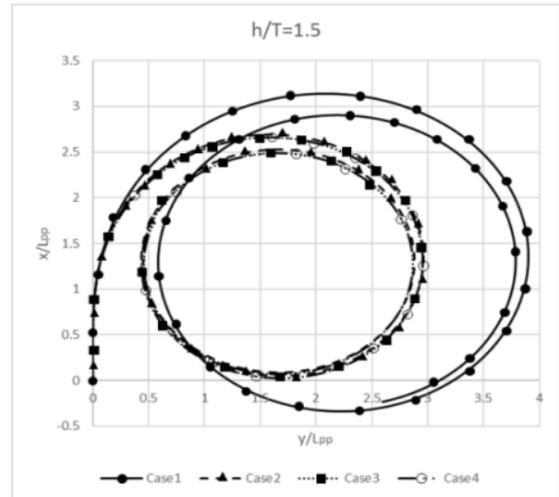


Fig. 15 Comparisons of 35° turning simulation trajectory(h/T=1.5)

Table 19 Comparisons of advance and tactical diameter (h/T=1.5)

h/T=1.2	Advance	Tactical diameter
Case 1	3.15 L _{PP}	3.81 L _{PP}
Case 2	2.74 L _{PP}	2.91 L _{PP}
Case 3	2.74 L _{PP}	2.90 L _{PP}
Case 4	2.74 L _{PP}	2.91 L _{PP}

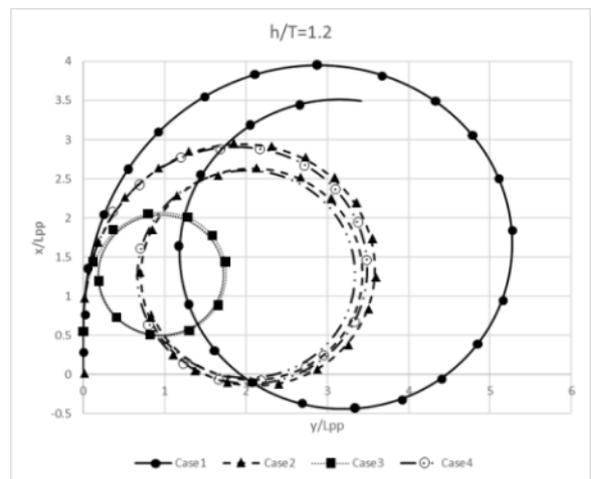


Fig. 16 Comparisons of 35° turning simulation trajectory(h/T=1.2)

Table 20 Comparisons of advance and tactical diameter (h/T=1.2)

h/T=1.2	Advance	Tactical diameter
Case 1	3.87 L _{PP}	5.08 L _{PP}
Case 2	1.98 L _{PP}	1.71 L _{PP}
Case 3	2.88 L _{PP}	3.24 L _{PP}
Case 4	2.87 L _{PP}	3.16 L _{PP}

5.3 천수 중 조종성능 추정 결과 고찰

침로 안정성과 선회성능을 추정 할 경우, h/T=1.5에서 보다 h/T=1.2에서 본 연구에서 제안하는 방법을 사용하는 것이 더 효율적으로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

침로안정성의 경우 h/T=1.5에서는 경험식과 제안한 방법의 차이가 크지 않았으나, h/T=1.2에서는 경험식의 경우 첫 번째, 두 번째 오버슈트 각 모두 모형시험 결과에 비하여 크게 나타났다. 모형시험의 첫 번째 오버슈트 각각 두 번째 오버슈트 각은 각각 0.9°, 1.0°이었으나, 경험식은 4.5°, 15.1°로 계산되었다. N'_v, Y'_r 를 CFD 결과로 대체 하였을 경우 첫 번째 오버슈트 각은 1.6°, 두 번째 오버슈트 각의 경우 2.3°로 감소하여 모형시험 결과에 근접하는 것을 확인 할 수 있었다.

선회 성능의 경우 h/T=1.5에서는 경험식과 제안한 방법의 차이가 크지 않았으나, h/T=1.2에서는 경험식을 이용한 선회 성능이 모형시험에 비하여 오차가 크게 나타났다. 모형시험의 전진거리와 전술선회반경은 각각 3.15L, 3.81L이었으나 경험식의 경우 1.98L, 1.71L로 계산되었다. N'_v, Y'_r 을 CFD 결과로 대체 하였을 경우 전진거리는 2.74L로, 전술 선회반경은 2.91L로 모형 시험 결과에 근접하는 것을 확인 할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 선박 초기설계단계에서 천수 중 조종성능 추정 정도를 높이기 위하여 CFD를 이용하여 추정 정도를 보완하는 방법을 제안하였다. 이를 통하여 CFD를 이용하여 전체 유체력 미계수를 도출하는데 소요되는 시간문제, 경험식만을 이용하였을 시 발생하는 물리적 경향과 다른 결과 도출에 따른 조종성능 추정 정확도 문제를 개선 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 CFD를 이용하여 천수 중 조종성능 추정 정도를 보완하는 방법을 위하여 천수 중 경험식의 오차가 큰 유체력 미계수를 확인하고, CFD 계산이 유리한 미계수를 찾기 위하여 CFD 기반의 가상 구속모형 시뮬레이션을 수행하였고, 경험식, 모형시험 결과와 비교하였다. 천수 중 미계수 추정을 위한 경험식은 Kijima의 경험식을 사용하였고, 모형시험 결과는 Yasukawa et al. (2014)의 연구에 공개된 결과를 사용하였다.

또한, 본 연구에서 제안하는 방법의 유효성을 검토하기 위하여 조종운동 시뮬레이션 모델을 구성하고, 제안한 방법과 모형시험으로 도출된 미계수를 이용한 조종운동 시뮬레이션 결과 비교를 통해 모형시험, 침로안정 성능 및 선회성능 추정 결과를 비교하였다.

이를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

첫째, 천수 중 가상구속모형시험의 결과를 통해, h/T=1.5에서 보다 h/T=1.2에서 CFD를 이용한 N'_v, Y'_r 미계수 추정이 경험식에 비하여 유리한 것을 확인 할 수 있었다.

둘째, 조종 운동 시뮬레이션 결과 비교를 통하여, 본 연구에서 제안하는 방법이 경험식 결과만 사용하는 방법에 비하여 조종 성능 추정이 모형시험 결과에 근접하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 침로안정성 평가에 유효함을 확인 할 수 있었다.

셋째, 초기 설계 단계에서 조종 성능 추정정도를 높이기 위해서는 조종 유체력 미계수 중 N'_v, Y'_r 을 정도 높게 추정 하는 것이 필요하다.

향후 천수 영역에서 선체에 작용하는 유체력을 잘 표현하는 정도 높은 유체력 미계수 추정 경험식의 도출을 위해서는 CFD 계산 및 모형시험을 이용한 유체력 계산 및 계측 시험이 다양한 수심에서 수행되는 것이 요구된다.

후기

본 연구는 산업자원통신부 그린카 등 수송시스템 산업핵심기술개발사업 '선박의 운항효율 향상을 위한 부가저항이 고려된 선형설계 항상 기술 개발'(과제번호: 10062881), '무평형수 선박 구현을 위한 핵심 기술 개발'(과제번호: 10073215), '평형수가 필요 없는 선박의 개념 설계 개발'(과제번호: 10052420)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Ankudinov, K., 1990. Manoeuvring performance of tug/barge assemblies in restricted waterways. *Proceedings MARSIM & ICSM 90*, Tokyo, 1990.

ITTC, 2002. Manoeuvring committee: Final report and recommendation. *Proceedings of 23th ITTC*, Venice, skfWk Italy, 8-14 September 2002, 3, pp.204-205.

ITTC, 2011. Manoeuvring Committee: Final report and recommendation. *Proceedings of 26th ITTC*, Rio de Janeiro, Brazil, 14-20 September 2008, pp.143-208.

- Jebsen, J.J. & Papakonstantinou, V.C., 1997, Evaluation of the physical risk of ship grounding, master's thesis, Massachusetts Institute of Technology. pp. 1-239.
- Kijima, K., Nakiri, Y., Tsutsui, Y. & Matsunaga, M., 1990, Prediction methods of ship manoeuvrability in deep and shallow water. *Proceedings MARSIM & ICSM 90*, Tokyo, 1990. pp.311-318.
- Kim, D.Y., Kim, I.T., Han, J.S., Kim, S.J. & Kim, S.H., 2016. A study on the hydrodynamic derivatives estimation of KVLCC2 using virtual captive model test. *Proceedings of KAOSTS Academic Conference*, Pusan, Korea, 15-20 May 2016, SNAK pp.510-513
- Kim, D.Y., 2017, A study on the analysis method of ship maneuverability in waves considering the wave drift force. master's thesis, Inha university, pp. 1-156.
- Kim, D.Y., Kim, S.H., Han, J.S., Kim, S.J. & Paik, K.J., 2017. A study on the sensitivity analysis of the hydrodynamic derivatives on the maneuverability of kvlcc2 in shallow water. *Portal of Scientific Journals of Croatia*, 68(4), pp.1-22.
- Kim, S.W., Yeo, D.J., Rhee, K.P & Kim, D.J., 2008. Prediction of manoeuvrability of a ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.280-287.
- Matsumoto, K. & Suemitsu, K., 1980. The prediction of manoeuvring performances by captive model tests. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects. Japan*, 176, pp.11-22.
- SIMMAN, 2008. Part G: Comparison of results for free manoeuvre simulations - Systems and CFD based methods. *Proceedings of SIMMAN 2008*, Lyngby, Denmark, 14-16 April 2008, pp.G1-G277.
- SIMMAN, 2014. Instructions for CFD-Based method, Copenhagen, Denmark 8-10 Dec. 2014, pp.1-22
- Sheng, Z., 1981. Contribution to the discussion of the manoeuvrability committee report. *16th ITTC proceedings*, Leningrad, Soviet Union, 31 Aug - 9 Sept. 1981, pp.249-298.
- Sung, Y.J. & Park, S.H., 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based virtual captive model tests. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), pp.407-417.
- Yasukawa & Sano, 2014. Maneuvering prediction of a KVLCC2 model in shallow water by a combination of EFD and CFD, *Preprints of Workshop Proceeding SIMMAN 2014*, Copenhagen, Denmark, 8-10 Dec. 2014, pp.115-121.
- 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*, 210, pp.77-84.
- Yun, K.H., Park, K.R. & Park, B.J., 2014. Study of ship squat for KVLCC2 in shallow water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), pp.539-547.

