

MMG 모델을 이용한 제한수로를 운항하는 선박의 침로안정성능 추정에 관한 연구

김현철* · † 김인태 · 김상현** · 권수연***

*인하대학교 황해권수송시스템연구센터 연구원, † 인하대학교 조선해양공학과 대학원 박사과정, **인하대학교 조선해양공학과 교수, ***한국해양교통안전공단 차석검사원

A Study on Estimation of the Course Keeping Ability of a Ship in Confined Waterways Using the MMG Model

Hyunchul Kim* · † In-Tae Kim · Sanghyun Kim** · Soo Yeon Kwon***

*Researcher, Yellow Sea Transportation System Research Center, Inha University

† Ph.D Student, Graduate School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University

**Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University

***Principal Surveyor, Korea Maritime Transportation Safety Authority

요 약 : 선박이 제한수로를 운항할 때에는 기존 심수 및 천수 중을 운항하는 선박의 조종특성과 일반적으로 다르기 때문에 선박의 안전한 항해를 위해 달라지는 선박의 조종특성 추정이 중요하다. 본 연구에서는 제한수로를 운항하는 선박의 조종성능을 추정하기 위해 조종운동 방정식과 가상 구속모형시험 시뮬레이션을 통한 유체력 미계수를 이용하여 조종성능을 추정하였다. 조종 수학 모델 중 선체, 프로펠러, 타를 분리하여 유체력을 모델링하는 방식인 모듈형(modular type) 모델에 제한수로의 영향을 고려하는 항을 추가하여 제한수로 중 조종성능을 추정 연구를 수행하였다. 제한수로 중 선체에 작용하는 유체력 미계수를 도출하기 위하여 상용 CFD 프로그램을 이용한 가상 구속모형시험 시뮬레이션을 수행하였다. 최종적으로 제한수로 중 직진 시뮬레이션과 Zig-zag 시뮬레이션을 수행하여 제한수로의 영향이 고려된 조종 시뮬레이션을 수행하였다. 특히 선박의 침로 안정성능을 평가하기 위해 Zig-zag 시험을 수행하는데, 측벽으로 인한 선박 주위의 비대칭 유동이 좌현과 우현에 압력 차이를 발생시켜 선박의 궤적에 큰 영향을 미침을 확인하였다.

핵심용어 : 제한수로, MMG 모델, 침로안정성능, 가상 구속모형시험, 전산유체역학

Abstract : Ship hydrodynamics in the confined waterways is challenging. When a ship is maneuvering in confined waterways, the hydrodynamic behavior may vary significantly because of the hydrodynamic interaction between the bottom of the ship hull and the seabed, or so-called shallow water effects. Thus, an accurate prediction of shallow water and bank effects is essential to minimizing the risk of the collision and the grounding of the ships. The hydrodynamic derivatives measured by the virtual captive model test provide a path to predicting the change in ship maneuverability. This paper presents a numerical simulation of captive model tests to predict the maneuverability of a ship in confined waterways. Also, straight and zig-zag simulation were conducted to predict the trajectory of a ship maneuvering in confined waterways. The results showed that the asymmetric flow around a ship induced by vicinity of banks causes pressure differences between the port and starboard sides and the trajectory of a ship maneuvering in confined waterways.

Key words : Confined Waterways, MMG Model, Course Keeping Ability, Virtual Captive Model Test, CFD

1. 서 론

최근 선박의 좌초 및 충돌 사고로 인하여 발생하는 해양오염문제에 대한 관심이 커짐에 따라 선박의 조종성능에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히, 선박의 대형화에 따라 제한수로를 운항하는 선박이 증가하고, 전체 사고의 1/3 이상이 얕은 수심에서 발생하기에 제한수로 중 조종성능의 평가는 더욱 중

요해지고 있다. 특히 제한수로 조건에서 운항하는 선박의 경우 일반 대양을 운항하는 선박과 다른 조종특성이 발생하며 선박의 안전한 항해를 위해 달라지는 선박의 조종특성 추정이 중요하다.

선박의 조종성능을 추정하는 가장 정확한 방법에는 실선의 시운전 방법이 있지만 과도한 시간과 비용을 필요로 한다. 이러한 이유로 선박의 조종성능을 추정할 때 자유항주를 이용한 방법, 조종운동 방정식과 구속모형시험의 결과로 도출된 조종

† Corresponding author : 정회원, m1alxo@naver.com 032)860-8812

* 정회원, apollo1117@naver.com 032)860-8812

** 정회원, kimsh@inha.ac.kr 032)860-7344

*** 정회원, kissiny@kosma.or.kr 044)330-2451

유체력 미계수를 이용하여 간접적으로 추정하는 방법이 일반적으로 이용된다. 특히 구속모형시험을 통해 정도 높은 유체력 미계수 추정이 가능하기 때문에 이를 통한 선박의 조종성능 추정 연구와 함께 제한수로가 선박에 미치는 영향을 알아보기 위한 연구는 실험적인 방법과 수치적인 방법으로 많이 수행되어 왔다. Vantorre et al.(2003)은 경사진 벽이 구축된 수조에서 구속모형시험을 수행하여 수심, 선박과 측벽사이의 거리, 선속의 영향을 조사하였고 선박과 벽 사이에 상호작용하는 힘을 계산할 수 있는 경험식을 제안하였다. 제한수로 중 구속모형시험에 관한 연구는 Sano et al.(2014)가 컨테이너 모형을 이용하여 구속모형시험을 수행하였고, Furukawa et al.(2015)가 KCS와 KVLCC2선형을 이용하여 천수와 측벽을 구현한 예인수조에서 구속모형시험을 수행한 바 있다. Liu et al.(2015)는 KVLCC2 선형을 이용하여 측벽을 구현한 상태에서 PMM 시뮬레이션을 수행하였고 침로안정성을 평가하였다. Liu et al.(2017)는 천수와 측벽이 구현된 회류수조에서 구속모형시험을 수행하였고 KVLCC2의 침로안정성을 평가하였다.

본 연구에서는 제한수로를 운항하는 선박의 침로안정성을 추정하기 위해 조종운동 방정식과 가상 구속모형시험 시뮬레이션의 결과로 도출한 유체력 미계수를 이용하여 침로안정성을 추정하였다. 또한 조종 수학 모델 중 선체, 프로펠러, 타를 분리하여 유체력을 모델링하는 방식인 모듈형(modular type) 모델에 제한수로의 영향을 고려하는 항을 추가하여 조종 시뮬레이션 모델을 구축하고 직진 및 Zig-zag 시뮬레이션을 통하여 제한수로 중 조종성능 추정 연구를 수행하였다.

2장에서는 본 연구에서 사용된 좌표계와 조종운동 방정식을 설명하였고, 3장에서는 제한수로 중 가상 구속모형시험 조건 및 수행 결과에 대한 설명, 4장에서는 제한수로 중 조종 시뮬레이션을 수행 결과에 대한 설명을 하였고 5장에 결론을 내렸다.

2. 조종운동 방정식

2.1 좌표계

본 연구에서 사용된 좌표계 및 파라메타는 Fig. 1과 같다. 좌표계의 x, y축의 원점은 선체 중앙부로 취하고 선박의 선수 방향을 x축, 우현 방향을 y축, 선저 방향을 z축의 양(+)의 방향으로 정의하였다. W는 수로의 폭, U는 선속, β 는 사향각, η 는 수로 중심선으로부터 떨어진 선박 중심까지의 거리로 지정하였다. η 는 선박의 중심이 수로 중심선으로부터 떨어진 거리를 나타내며, 제한수로의 영향을 고려하기 위하여 다음과 같이 정의하였다. $\dot{\eta} = u \sin\psi + v \cos\psi$ 로 나타내며 전후 방향 속도, 좌우 방향 속도 및 선수각으로 표현하였다.

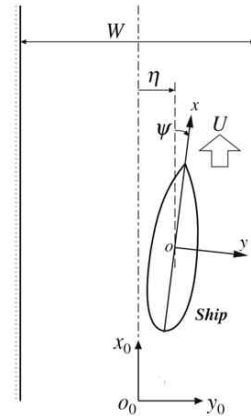


Fig. 1 Coordinate system

2.2 조종운동 방정식

본 연구에서는 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 선수동요(Yaw)의 3자유도 조종운동 방정식을 사용한다.

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

또한 본 연구에서는 선체와 프로펠러, 타에 작용하는 유체력을 각각 분리하여 고려하는 MMG 수학모델을 사용하였다. 식 (1)의 우변에서 선체에 작용하는 유체력은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_H' &= -R_0' + X_{vv}'v'^2 + X_{vr}'v'r' + X_{rr}'r'^2 + X_{vvv}'v'^4 \\ Y_H' &= Y_v'v' + Y_r'r' + Y_{vvv}'v'^3 + Y_{rrr}'r'^3 \\ &\quad + Y_{vvr}'v'^2r' + Y_{vrr}'v'r'^2 + Y_{\eta\eta}'\eta'^2 + Y_{\eta\eta\eta}'\eta'^3 \quad (2) \\ N_H' &= N_v'v' + N_r'r' + N_{vvv}'v'^3 + N_{rrr}'r'^3 \\ &\quad + N_{vvr}'v'^2r' + N_{vrr}'v'r'^2 + N_{\eta\eta}'\eta'^2 + N_{\eta\eta\eta}'\eta'^3 \end{aligned}$$

3. 제한수로 중 가상 구속모형시험 조건

3.1 대상 선형

본 연구에서는 가상 구속모형시험 시뮬레이션의 결과를 비교하기 위해 Furukawa et al.(2015)가 수행한 모형시험 결과가 있는 KCS를 대상선박으로 선정하였다. KCS의 선형 및 주요 제원은 Fig. 2와 Table 1에 정리되어 있다.



Fig. 2 3D longitudinal view of the KCS model

Table 1 Main particulars of KCS

Dimensions	Full scale	Model scale
Scale	1.00	52.667
$L_{PP}(m)$	230.00	4.3671
$B(m)$	32.20	0.6114
$d(m)$	10.8	0.2051
$\nabla(m^3)$	52030	0.3562
C_b	0.651	0.651

3.2 수치해석 조건

상용 수치해석 프로그램으로 RANS(Reynolds Average Navier-Stokes) 기반 수치해석 프로그램인 STAR-CCM+를 사용하였다. 본 연구에서는 계산 영역을 Fig. 3과 같이 지정하였다. 전체 계산 영역의 크기는 선체 앞쪽으로는 선체 길이의 2.0배, 선체 뒤쪽으로는 선체 길이의 2.5배, 선체 위쪽으로는 0.5배로 지정하였다. 제한수로를 구현하기 위하여 선저와 바닥면까지의 거리는 수심/흘수 = 1.2로 결정하였다.

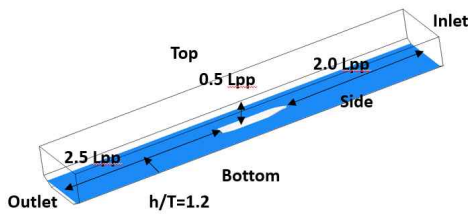


Fig. 3 Overview of computational domain

계산 기법은 선체의 동적 자세변화를 고려하기 위해서 계산 영역 전체를 병진/회전하는 DFBI(Dynamic Fluid Body Interaction) 기법을 사용하였고 제한수로 조건에서의 자세변화를 계산하기 위하여 Overset mesh 기법을 적용하였다. 경계 조건은 아래의 Table 2와 같이 설정하였다.

Table 2 Boundary condition

Boundary	Boundary condition
Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Top	Velocity inlet
Side	No slip condition -moving wall
Bottom	No slip condition -moving wall

3.3 격자 수렴성 검토

가상 구속모형시험 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 격자 수렴성을 검토하였다. $\eta' = 0.38$ 위치에서의 유체력 계측 시뮬레이션을 대상으로 5개의 격자계에 대해 격자 수렴성 검토를 수

행하였다. 각 격자계의 크기는 Refinement ratio가 $\sqrt{2}$ 인 값으로 크기를 증가시켜 결정하였고, 이때 Refinement ratio의 값은 ITTC(2008)의 Recommended Procedure and Guideline을 참고하여 결정하였다.

Fig. 4는 각 격자계에 따라 추정된 무차원화 된 Sway 힘과 Yaw 모멘트의 격자 수렴성 검토 결과를 나타내었다. 가장 fine한 격자계(약 5백만개의 격자)에서도 수치해가 수렴하지 않고 여전히 변화하며, 더 fine한 격자계를 사용해야만 큰 수치 불확실성을 피할 수 있을 것으로 판단되었다. 이는 기존 연구 Hoydonck et al.(2015)와 Zou and Larsson(2013)의 연구에서도 이러한 결과가 관찰되었으며, 격자 수렴 불가로 인한 수치 오차를 감안하여 추후 수치 시뮬레이션을 진행한 바 있다. 본 연구에서도 수치 비용을 고려하여 Grid 3의 격자계를 사용하여 본 시뮬레이션을 진행하고자 한다.

Table 3 Condition of grid convergence study

	h_i/h_1	Number of cells	y^+ on hull surface
Grid 1	1.000	5,113,425	34.6
Grid 2	1.414	3,818,470	38.8
Grid 3	2.000	2,965,284	43.5
Grid 4	2.828	2,316,666	49.0
Grid 5	4.000	1,706,909	54.9

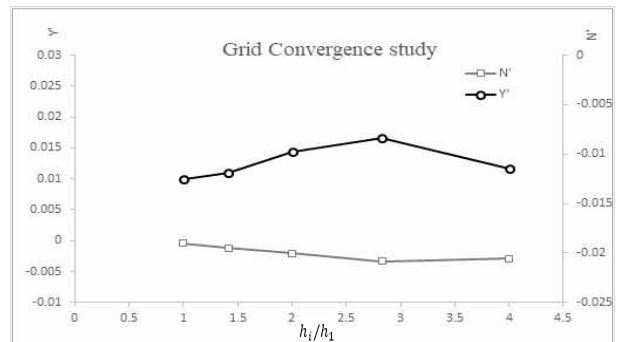


Fig. 4 Grid convergence study

3.4 가상 구속모형시험 검증

가상 구속모형시험 시뮬레이션 검증을 위하여 Furukawa et al.(2015)의 연구에서 수행된 제한수로 중 구속모형시험 결과와 비교하였다. 대상 시험은 정적 편류각 시험과 수로 중심선으로부터 떨어진 거리에 따른 유체력 계측 시험이다. 시뮬레이션 결과를 비교 및 검증하기 위한 시뮬레이션 케이스는 Table 4와 같다. 이때 종동요 및 상하동요는 구속하여 시뮬레이션을 진행하였다. 모형선의 선속은 Furukawa et al.(2015)에서 수행된 프루드 수, $Fr = 0.061$ 에 해당하는 속도로 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 4 Test conditions for validation

Parameters	Condition
β	2.5°, 5°, 7.5°, 10°
η'	0.2, 0.3, 0.34, 0.38

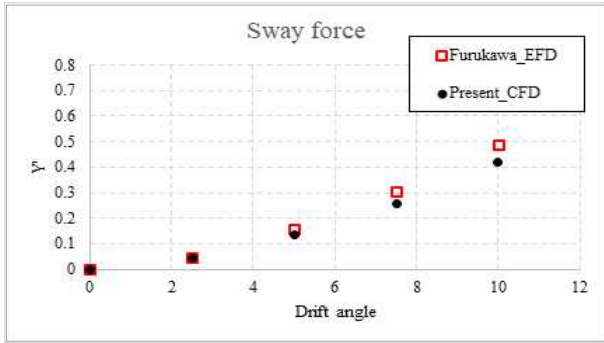


Fig. 5 Non-dimensional sway force for static drift

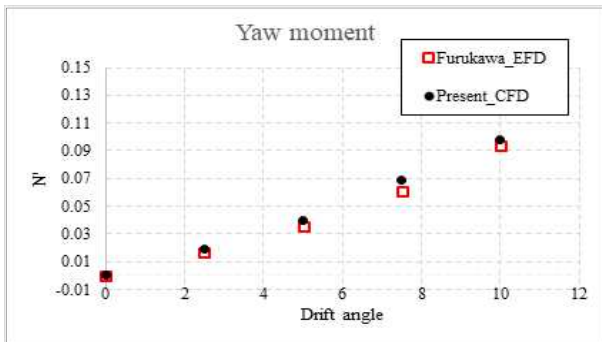


Fig. 6 Non-dimensional yaw moment for static drift

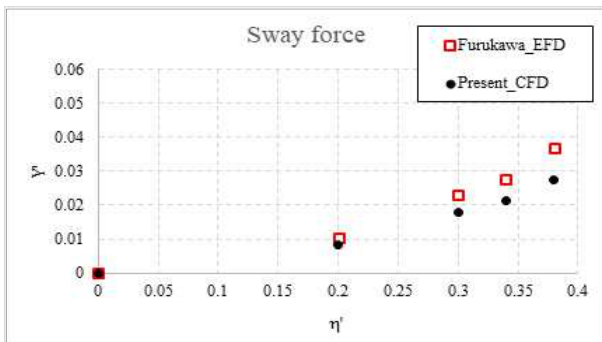


Fig. 7 Non-dimensional sway force for η simulation

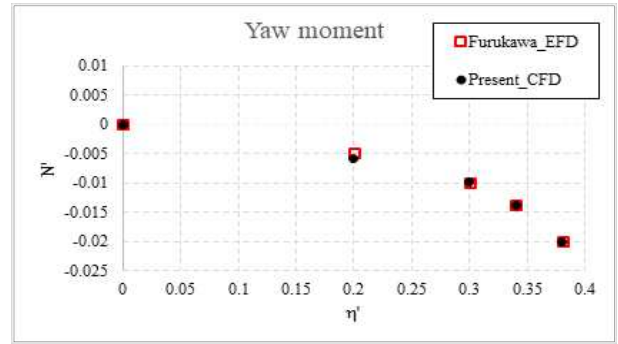


Fig. 8 Non-dimensional yaw moment for η simulation

Table 5 Computed and experimental values of hydrodynamic derivatives

	EFD	CFD	Error (%)
Y'_β	1.232	1.491	21.02%
$Y'_{\beta\beta\beta}$	39.11	43.65	11.61%
N'_β	0.4413	0.3726	15.57%
$N'_{\beta\beta\beta}$	3.983	5.343	34.15%

Table 6 Computed and experimental values of hydrodynamic derivatives

	EFD	CFD	Error (%)
Y'_η	0.06921	0.05438	21.43%
$Y'_{\eta\eta\eta}$	0.14690	0.09485	35.43%
N'_η	-0.03042	-0.03096	1.78%
$N'_{\eta\eta\eta}$	-0.08342	-0.11000	31.86%

정적 편류각 시험 시뮬레이션 결과로 추정된 유체력 미계수는 모형시험 결과로 추정된 유체력 미계수와 비교하여 약 11~34%의 오차를 가졌다. 수로 중심선으로부터 떨어진 거리에 따른 유체력 계측 시뮬레이션 결과로 추정된 유체력 미계수는 1~35%의 오차를 가졌다.

앞서 수행하였던 격자 수렴성 검토의 결과에서 볼 수 있듯이 수치해가 수렴하지 않아 오차가 발생하였다고 판단하였다. 이에 관하여 제한수로에서 선박에 작용하는 유체력 계측을 통해 측벽의 영향을 알아보는 기존 연구가 있다. Hoydonck et al.(2015)의 연구의 결과에서는 여러 CFD 프로그램을 이용하여 측벽 주위를 운항하는 선박에 작용하는 Sway 힘과 Yaw 모멘트를 측정하여 모형시험 결과와 비교하였다. Sway 힘의 경우, 20~50% 오차를 가졌고, Yaw 모멘트의 경우, 25~100%의 오차를 가졌으며 오차의 원인을 격자 수렴의 어려움 및 실험의 불확실성이라 설명하였다(Hoydonck et al, 2015). 본 연

구에서도 bank effect 시뮬레이션의 격자 수렴의 어려움으로 인한 수치 오차를 감안하여 추후 제한수로에서의 가상 구속모형시험과 수로 중심선으로부터 떨어진 거리에 따른 유체력 계측 시뮬레이션을 진행하였다.

3.5 제한수로 중 유체력 미계수 추정

본 연구에서는 제한수로 중 선박의 조종성능 추정을 위한 유체력 미계수 취득을 위하여 제한수로에서 가상 구속모형시험 시뮬레이션과 수로 중심으로부터 떨어진 거리에 따른 유체력 계측 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9, Fig. 10는 제한수로 중 정적 편류각 시험 시뮬레이션을 수행한 후 sway 힘과 yaw 모멘트를 편류각 별로 나타낸 결과이다. Fig. 11은 순수 좌우동요 시험 시뮬레이션 해석 결과를 나타내었다. Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14은 순수 선수동요 시험 시뮬레이션 해석 결과를 나타내었다. Fig. 15, Fig. 16은 Sway 힘과 Yaw 모멘트를 각 η' 별로 나타낸 결과이다.

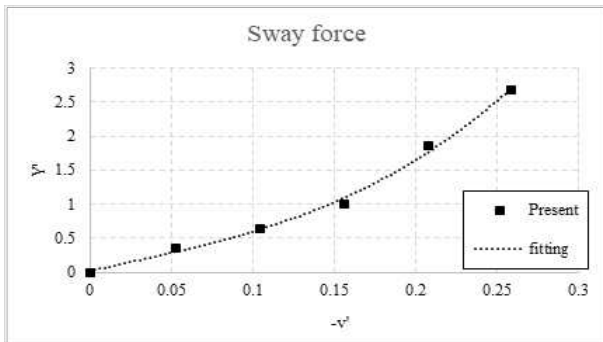


Fig. 9 Non-dimensional sway force for static drift simulation

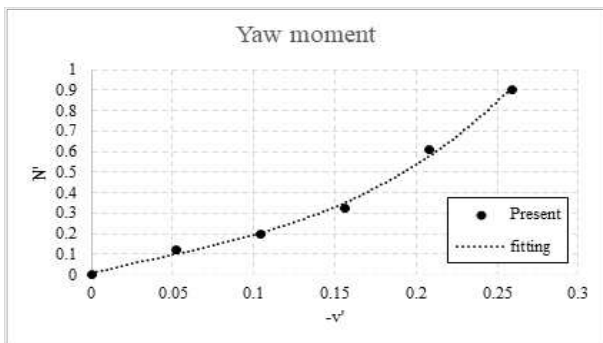


Fig. 10 Non-dimensional yaw moment for static drift simulation

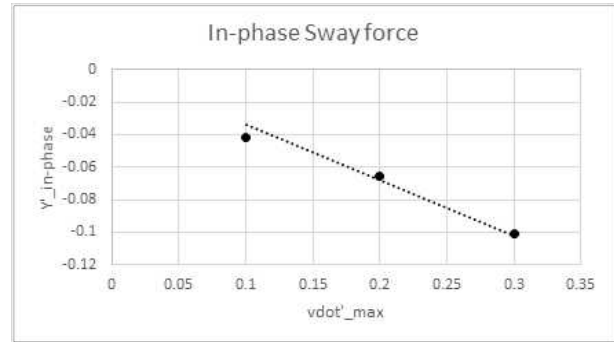


Fig. 11 Non-dimensional in-phase sway force for pure sway simulation

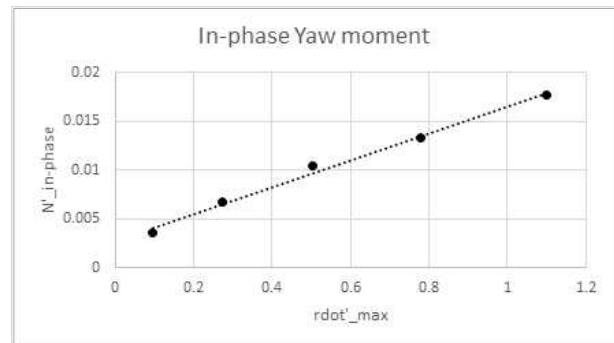


Fig. 12 Non-dimensional in-phase yaw moment for pure yaw simulation

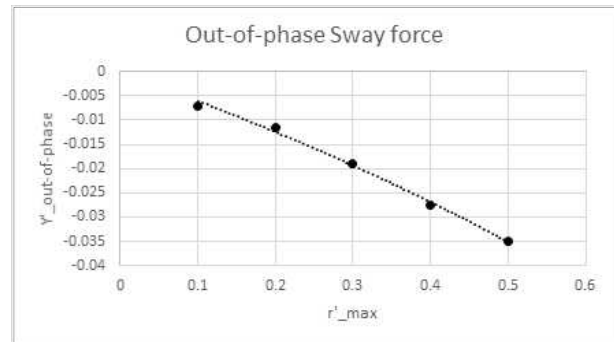


Fig. 13 Non-dimensional out-of-phase sway force for pure yaw simulation

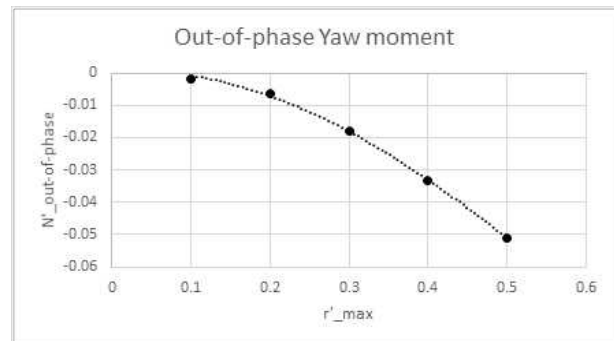


Fig. 14 Non-dimensional out-of-phase yaw moment for pure yaw simulation

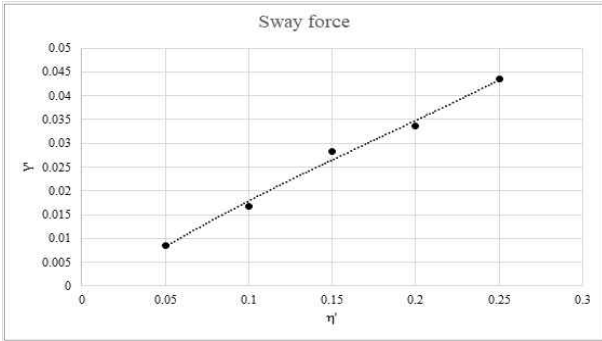


Fig. 15 Non-dimensional sway force for η simulation

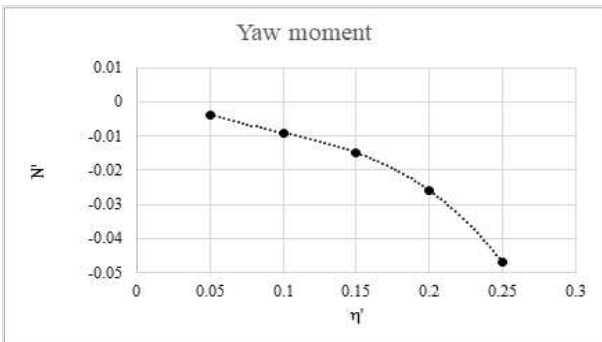


Fig. 16 Non-dimensional yaw moment for η simulation

4. 제한수로 중 조종 시뮬레이션

4.1 직진 시뮬레이션

앞서 수행했던 가상 구축모형시험 시뮬레이션의 결과로 도출한 유체력 미계수와 조종운동 방정식을 이용하여 조종 시뮬레이션 모델을 구축하였고 조종 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 15는 $\eta'=0.3$ 의 위치에서 직진 시뮬레이션을 수행했을 때 궤적을 나타낸 것이다. 제한수로의 영향을 고려한 직진 시뮬레이션의 경우, 대상선이 점점 벽 쪽으로 향하지만 그렇지 않은 경우는 제한수로의 영향을 고려하지 않았기 때문에 그대로 직진하는 것을 볼 수 있다. 또한 수로 벽에 가까울수록 벽 쪽으로 향하는 궤적이 크게 변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18은 각각 무치원화 된 수로 중심부터 벽까지의 거리 $\eta'=0.3$ 의 위치에서 직진 시뮬레이션을 수행했을 때, 시간에 따른 sway 방향 속도, yaw 방향 각속도, 선수각을 나타내었다. 직진 시뮬레이션이 진행될수록 선체가 벽 쪽으로 향하는 속도가 증가하며, 선수부가 벽으로부터 밀리는 각속도가 증가하고 그에 따라 선수각이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

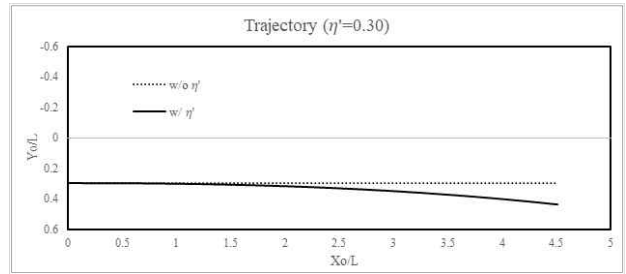


Fig. 17 Trajectory for straight simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.30$)

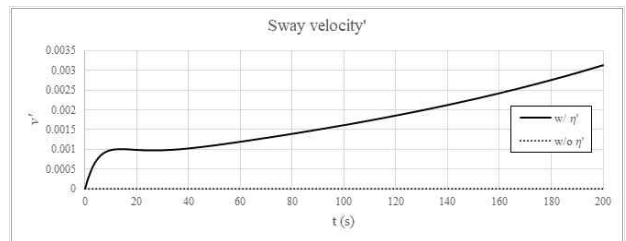


Fig. 18 Non-dimensional sway velocity for straight simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.30$)

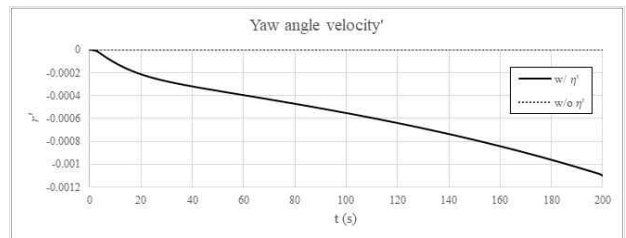


Fig. 19 Non-dimensional yaw velocity for straight simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.30$)

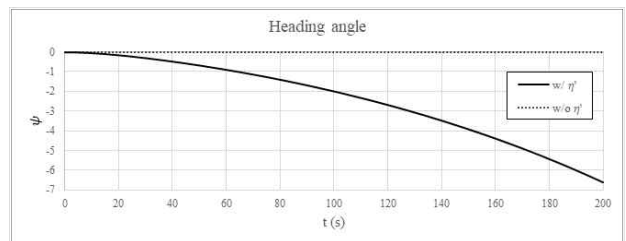


Fig. 20 Heading angle for straight simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.30$)

4.2 Zig-zag 시뮬레이션

통상적으로 선박의 침로안정 성능을 평가하기 위해서 Zig-zag 시험이 이용된다. 일반적으로 천수 중에서는 $10^\circ/2.5^\circ$ 또는 $20^\circ/5^\circ$ Zig-zag 시험을 이용합니다(SIMMAN, 2014).

Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22은 각각 $\eta'=0.12$, $\eta'=0.18$, $\eta'=0.24$, $\eta'=0.30$ 의 위치에서 수행한 $10^\circ/2.5^\circ$ Zig-zag 시뮬레

이선 궤적을 나타내었다. 직진 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 제한수로의 영향을 고려한 Zig-zag 시뮬레이션의 경우, 대상선이 점점 벽 쪽으로 향하하는 궤적을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 수로의 벽에 가까울수록 벽 쪽으로 향하는 궤적이 크게 변하는 것을 아래 그림에서 확인할 수 있다.

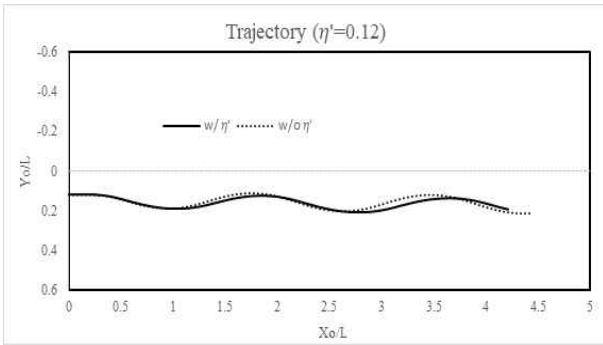


Fig. 21 Trajectory for zig-zag simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.12$)

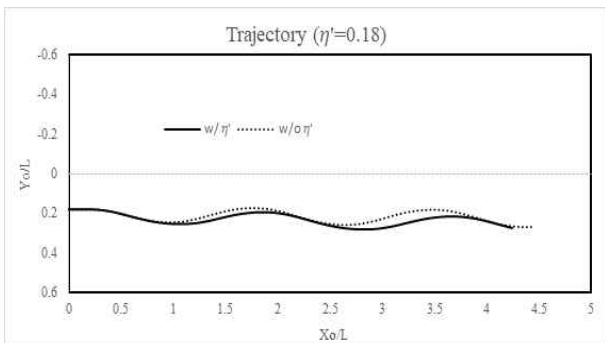


Fig. 22 Trajectory for zig-zag simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.18$)

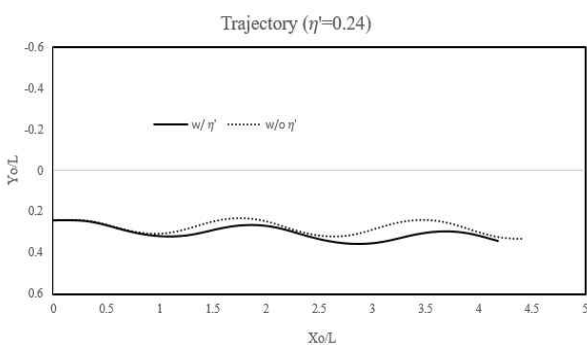


Fig. 23 Trajectory for zig-zag simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.24$)

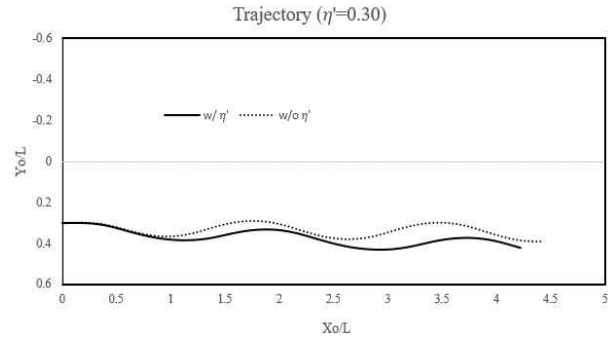


Fig. 24 Trajectory for zig-zag simulation w/ and w/o η ($\eta'=0.30$)

Fig. 23은 서로 다른 η' 의 위치에 따른 Zig-zag 시뮬레이션을 수행하여 선수각 결과와 Overshoot angle을 비교하여 나타낸 것이다. η' 가 커질수록, 즉 수로 중심선으로부터 멀리 떨어진 곳일수록 첫 번째 Overshoot angle은 커지나 두 번째 Overshoot angle은 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 첫 번째 Overshoot angle을 측정할 때 선체는 측벽의 영향으로 선수각이 벽으로부터 밀리는 yaw 모멘트를 받아 Overshoot angle이 두 번째 Overshoot angle을 측정할 때와는 반대의 경향을 보임을 확인하였다.

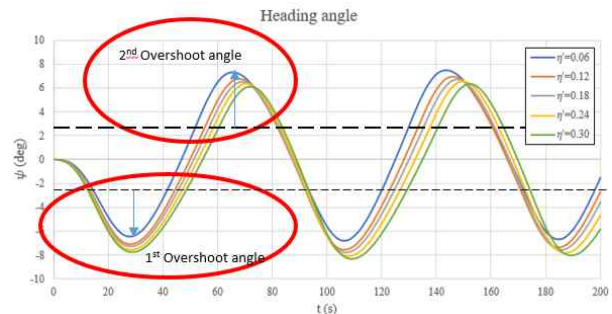
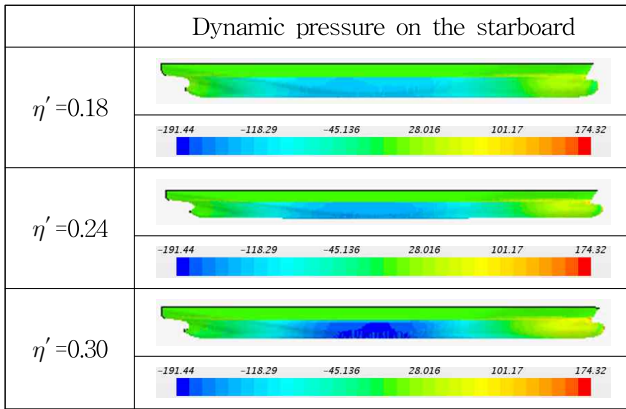


Fig. 25 Heading angle for zig-zag simulation for different η

4.3 고찰

직진 및 Zig-zag 시뮬레이션의 결과로 수로 벽에 가까울수록 벽 쪽으로 향하는 궤적이 크게 변함과 Overshoot angle의 크기가 달라짐을 볼 수 있었다. 이는 제한수로에서 가상 구속 모형시험 시뮬레이션과 수로 중심으로부터 떨어진 거리에 따른 유체력 계측 시뮬레이션으로 얻어진 유체력 미계수의 영향임을 알 수 있다. 특히 η' 향에 관한 유체력 미계수의 영향으로 측벽으로 인한 선체가 받는 추가적인 유체력을 확인할 수 있으며 이를 확인하기 위하여 CFD를 이용하여 직진 시, 수로 중심으로부터 떨어진 거리에 따른 선측면(우현)의 동압력을 비교하였고, 그 결과는 Table 7과 같다.

Table 7 Comparison of dynamic pressure on the starboard



수로 중심으로부터 멀리 떨어질수록 선측면의 압력이 감소하는 것을 확인 있다. 이로 인하여 선박이 측벽 주위를 운항할 때 선체가 수로 벽 쪽으로 당겨지는 힘을 추가적으로 받게 되고, 이러한 선체에 작용하는 추가적인 유체력이 직진 및 Zig-zag 시뮬레이션을 진행함에 있어 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 제한수로를 운항하는 선박의 침로안정성능을 추정하기 위해 제한수로의 영향이 고려된 조종 시뮬레이션 모델을 구축하였고, 제한수로 중 가상 구속모형시험 시뮬레이션과 수로 중심으로부터 떨어진 거리에 따른 유체력 계측 시뮬레이션을 이용하여 제한수로 조건에서의 유체력 미계수를 도출하였다. 또한 서로 다른 η' 에 따른 제한수로에서의 직진 시뮬레이션 및 Zig-zag 시뮬레이션을 수행하였고, 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

제한 수로 중 직진 및 Zig-zag 시뮬레이션을 통하여 측벽으로부터 발생한 유체력의 영향에 따라 시뮬레이션 궤적이 달라지는데, 이는 측벽의 영향을 고려하는 η' 항에 관한 유체력 미계수의 영향으로 측벽으로 인한 선체가 받는 추가적인 유체력이 시뮬레이션 결과에 영향을 미쳤다. 이는 측벽으로 인한 선박 주위의 비대칭 유동이 좌현과 우현에 압력 차이를 발생시켜 선박의 궤적에 큰 영향을 미쳤다.

위의 결론으로부터 제한수로 중 선박의 침로안정성능을 평가 할 시 측벽으로 인한 선체에 발생하는 추가적인 유체력의 영향을 고려하는 것이 중요할 것으로 판단되었다. 또한 조종 시뮬레이션 결과 정도 향상을 위하여 본 연구에서는 고려되지 않았던 제한수로의 영향에 의한 타와 프로펠러의 영향을 모델링하는 연구가 필요하다고 판단되고 제한수로에서의 운항 안정성을 평가하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

- [1] Furukawa, Y. et al.(2015), "Experimental Study of Interaction Forces Acting on Ship Hull by Bank effect", Proceedings of International Marine Simulator Forum.
- [2] Hoydonck, W. V. et al.(2015), "Bank Effects for KVLCC2", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 1-26.
- [3] International Towing Tank Conference(2008), "ITTC Recommended Procedure and Guideline - Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures", 7.5-03-01-01, pp. 1-13.
- [4] Liu, H. et al.(2016), "Numerical Simulation of PMM Tests for A Ship in Close Proximity to Sidewall and Maneuvering Stability Analysis", China Ocean Engineering, Vol. 30, No. 6, pp. 884-897.
- [5] Liu, H. et al.(2017), "Experimental Study on the Ship-Bank Interaction of a VLCC Ship in Shallow Water", Proceedings of the International Workshop on Ship Maneuvering and Control.
- [6] Sano, M. et al.(2014), "Directional Stability of a Ship in Close Proximity to channel wall", Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 376-393.
- [7] SIMMAN(2014), "Preprints of Workshop Proceedings". Workshop on Verifications and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods.
- [8] Vantorre, M. et al.(2003), "Experimental Investigation of Ship-Bank Interaction Forces", International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability.
- [9] Zou, L. and Larsson, L.(2013), "Confined Water Effects on the Viscous Flow around a Tanker with Propeller and Rudder", International Shipbuilding Progress, Vol. 60, No. 1, pp. 309-343.

Received 23 September 2019

Revised 2 October 2019

Accepted 27 November 2019