

천수 효과가 대형 컨테이너선의 저항 성능에 미치는 영향에 관한 전산유체역학 해석 연구

이선규¹·유영준^{2,†}·김진해¹

(주)대우조선해양 중앙연구원 선박해양연구소¹

울산대학교 조선해양공학부²

Shallow Water Effect on Resistance Performance of Large Container Ship Based on CFD Analysis

Sun-kyu Lee¹·Youngjun You^{2,†}·Jinhae Kim¹

Ship & Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.¹

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan²

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.

It is easy for a ship passing through confined waters to be exposed in dangers of collisions and grounding due to different hydrodynamic responses. Since marine accidents can cause significant impacts on environments, global economy, and human lives, it is necessary to study the effect of shallow water on hydrodynamic performance of a ship. In this paper, the effect of water depth on resistance performance was investigated using CFD analysis as an initial study for improving navigational safety of a large container ship under confined waters. After a CFD set-up for deep water condition was validated and verified by comparing CFD analysis with model test results, CFD calculations according to ship speed and water depth were conducted. The features were investigated in terms of tendency and physical knowledge related to resistance performance. The increase of resistance due to shallow water effect was reviewed with empirical formula suggested from SWABE JIP. Speed loss due to shallow water effect was additionally reviewed from estimated delivered power according to ship speed and water depth.

Keywords : Shallow water effect(천수 효과), Resistance(저항), Navigational safety(운항 안전성); Container ship(컨테이너선), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

제한 수로를 통과하는 선박의 경우 천수 효과 또는 안벽효과로 인해 선체에 부가적인 유체동하중이 작용하여, 대양에서와 다른 조종 특성이 나타나 충돌 또는 좌초 위험에 노출되기 쉽다. Jebson and Papakonstantinou (1996)은 미국 내 다섯 개 항구에서 발생한 전체 사고의 30 % 이상이 얇은 수심에서 발생했음을 보고한 바 있다. 해상 사고는 환경 오염, 경제적 손실 및 인명 사고 등 심각한 위험성이 예상되기 때문에, 정부, 산업체, 학계 등 다양한 주체들로부터 운항 안전성 관련 연구 필요성이 제기되어왔다. 특히, 2021년 3월 수에즈 운하에서 일어난 Ever given 호의 좌초 사고는 교통량이 많은 해역에서 발생한 해양 사고가 전 세계 물류 및 경제에 미치는 충격을 확인할 수 있었던 계기가 되었다.

PIANC (1992)에서는 수심과 흘수의 비율(h/T)을 기준으로 3.0 이상은 심수(deep water) 조건, 1.5보다 크고, 3.0보다 작은 구간은 중간수심(intermediate water) 조건, 1.2보다 크고 1.5보다 작은 구간은 천수(shallow) 조건, 1.2 이하의 극천수(very shallow) 조건으로 분류한 바 있다. 제한 수로에서 관찰되는 천수 효과 또는 안벽효과는 불확실성이 크고, 다양한 인자가 관련되어 있어 모형시험을 통한 연구가 많이 이루어져 왔다 (Vantorre, 2013). 하지만, 선박의 속도, 선형, 수심, 지형 등에 따라 요구되는 모형시험 조건이 많아, 예산 및 일정 측면에서 어려움이 많았다. 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용한 수치 해석 기법의 신뢰도가 향상됨에 따라, 수치 해석을 통해 천수 효과 및 안벽효과를 추정하는 연구가 수행되어 왔다. Zou et al. (2011)은 전산유체역학 수치 해석 프로그램인 SHIPFLOW를 이용하여 수심과 안벽으로부터의 거리에 따라 유체동하중 추정을

위한 수치 해석을 수행하였으며, Zou and Larsson (2013)은 추정된 유체동하중을 모형시험 결과를 비교하기도 했다. 다만, double body approximation 조건에서 수치 해석을 수행했기 때문에, 선체 주위의 자유수면 효과와 항주 자세는 고려하지 못했다. Meng and Wan (2016)은 자유수면 효과를 고려하여, 수심과 선수각에 따라 선체에 작용하는 유체동하중을 추정하였다. Pacuraru and Domnisoru (2017)는 전산유체역학 해석 프로그램인 NUMECA 및 FineMarine의 VOF 기법을 적용하여, 10 knots 이하 저속 조건에서 수심에 따른 천수 효과를 추정, 분석하였다.

본 논문에서는 제한 수로에서 대형 컨테이너선 운항 안전성 향상을 위한 초기 연구로서, 수심에 따른 천수 효과가 대형 컨테이너선의 저항 성능에 미치는 영향을 분석하고자 했다. 먼저, 심수 조건에서 전산유체역학 수치 해석을 통해 추정된 저항값과 모형 시험에서 측정한 저항값을 비교함으로써, 수치 해석에 이용된 격자, 시간 간격, 셋업 등의 타당성을 검증하였다. 검증된 방법론을 이용하여, 선박의 속도, 수심에 따라 저항 해석을 수행한 후, 계산된 트림(trim) 및 침하량(sinkage) 등의 특징을 분석하였다. 마지막으로, 추정된 전달 동력을 통해, 수심에 따라 증가한 저항이 속도 저하에 미치는 영향을 비교하였다.

본 논문의 2절에서는 대상 선박의 주요 제원을 포함한 해석 정보와 전산유체역학 수치 해석 시 셋업을 기술하였다. 3절에서는 수치 해석에 이용된 격자 및 시간 간격의 수렴성 시험 결과를 정리, 분석하였다. 4절에서는 수심에 따른 천수 효과가 저항 성능 및 항주 자세에 미치는 영향을 정리, 분석한 후, 추정된 전달 동력을 기준으로 선박의 속도 변화를 고찰하였다. 마지막으로 5절에서는 정리된 결과를 요약, 정리하였다.

2. 대상 선박 및 수치 해석 방법

2.1 대상 선박

본 연구에서는 (주)대우조선해양(DSME, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.)에서 2014년 건조한 13,100 TEU급 대형 컨테이너선을 대상으로 심수 조건에서 STAR-CCM+ 16.06 버전을 이용하여 수치 해석 및 모형시험 결과 비교 검증을 수행하였다 (DSME, 2012). 적용된 격자, 시간 간격, 셋업 등의 타당성을 검증한 후, h/T를 1.5부터 3.0까지 0.5 간격으로 바꾸며 저항 해석을 수행하였다. (단, 수에즈 운하(Suez Canal) 표준 단면의 수심인 h/T 1.7 조건에서의 결과를 추가하였다.) 13,100 TEU급 컨테이너선의 수치해석에 이용된 모델 형상은 Fig. 1과 같으며, 주요 제원은 Table 1과 같다. 수치 해석 모델의 축척비는

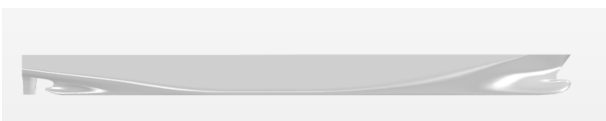


Fig. 1 Geometric model of the 13,100 TEU container ship (model-scale)

HSVA(Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GMBH) 수조 시험에 이용한 모형 선박의 축척비와 같은 38.15였다.

2.2 수치 기법

STAR-CCM+을 이용한 전산유체역학 수치 해석은 유체를 비압축성 점성유체로 가정한 후, 질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식 및 난류 모델 방정식을 이용하여 식 (1)에 표기된 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 풀이하였다. 여기서, $\frac{DV}{Dt}$ 는 단위 시간당 유체의 속도 변화량, ρ 는 유체밀도, p 는 압력, ν 는 동점성계수를 나타내며, F_i 는 중력과 대상체의 체적력을 의미한다.

속도와 압력의 연성은 STAR-CCM+에 내장된 SIMPLE 알고리즘으로 고려되었으며, 공간 및 시간 이산화는 각각 2차 상류 차분법(2nd order upwind scheme)과 2차 음해법(2nd order implicit method)을 적용하였다. Fig. 2와 3에 도시된 해석 공간의 outlet과 side에서는 반사파를 최소화하기 위하여 STAR-CCM+에 내장된 wave damping 기능을 적용하였으며, 계산 영역 전체를 병진/회전시키는 DFBI(Dynamic Body Fluid Interaction) 모델 및 중첩 격자(overset)를 이용하여 트림과 침하량을 구속하지 않은 상태로 해석하였다. Table 1에 정리된 것처럼, 수치 해석 시 비대칭 타를 고려하기 위하여 대상 선체의 전폭 모델을 이용하였다.

Table 1 Principal particulars of the 13,100 TEU container ship

Category	Item	Full-scale properties
Hull	Lpp [m]	349.50
	B [m]	48.40
	Ts [m]	14.00
	C _B [-]	0.686
	Scale ratio [-]	38.15
	Design speed [knots]	22.5
Propeller	Dp [m]	9.3
	Rotation [-]	Right
Rudder	Type [-]	twisted
	Aspect ratio [-]	1.24

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 + \frac{F_i}{\rho} \quad (1)$$

2.3 격자 및 경계 조건

본 연구에서 수심에 따른 천수 효과가 저항 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 해석 영역은 각각 Fig. 2, 3에 표시된 것과 같다. 표시된 해석 영역의 크기는 STAR-CCM+에서 제공하는 해

석 절차를 참고하고, 내부 해석 절차 정립을 위한 사전 분석을 통해 선택된 것이다 (Peric, 2019). h/T 에 따라 해석 영역, 즉 해저면부터 수면까지 깊이가 다르다. Fig. 3에서는 h/T 1.7인 조건의 해석 영역을 예시로 보여주고 있다. 앞서 언급했던 outlet, side에서의 wave damping 적용에 필요한 감쇠 영역(damping zone)은 $1.0L_{pp}$ 로 설정하였다.

전산유체역학을 이용한 수치 해석 시 경계조건은 Table 2에 정리되어 있다. 심수 조건에서는 bottom의 경계조건을 inlet의 경계조건과 같도록 velocity inlet으로 설정하여 종 방향(surge)으로 속도가 같아지도록 하였고, 선체 표면에서 유체의 속도가 0이 되도록 하는 wall 조건을 적용하여 no-slip 조건으로 해석하였다. 제한 수심 조건에서는 무한수심으로 가정하는 심수 조건과는 다르게 bottom의 경계조건을 설정하였다. Toxopeus et al. (2013)의 방법을 참고하여 bottom을 moving-wall (저항 해석 시 선체는 고정되어 있고, inlet 조건으로 유체가 이동하기 때문에 선체 바닥면의 움직임을 모사하기 위하여), no-slip 조건으로 설정하고, tangential velocity를 유입속도와 같도록 설정한 바 있다.

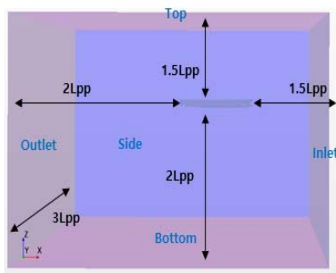


Fig. 2 Details of numerical domain for deep water condition

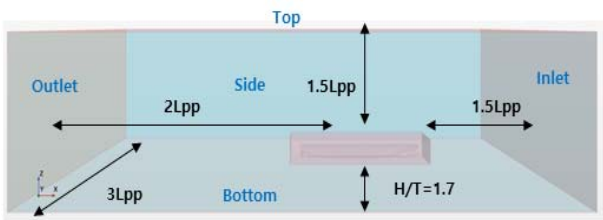


Fig. 3 Details of numerical domain for shallow water condition ($h/T = 1.7$)

Table 2 Boundary conditions for CFD analysis using STAR-CCM+ v.16.06

Boundary	Deep water	Intermediate and shallow water
Inlet	Velocity inlet	
Outlet	Pressure outlet	
Side (PORT, STBD)	Symmetry plane	
Top	Velocity inlet	
Bottom	Velocity inlet	Wall

수치 해석에 이용된 격자는 Fig. 5와 같다. Lee and Lee (2014)는 선체의 저항 해석 시 자유수면 및 선체 주변 격자를 밀집시키기 위하여 trimmed mesh와 prism layer를 적용한 바 있다. 본 연구에서도 trimmed mesh를 이용하고, prism layer를 이용하여 선체 경계면 및 제한 수심에서 수치 해석 시 bottom에서의 Y^+ 을 고려하였으며, 적용된 Y^+ 의 범위는 5 - 60 이며, 평균값은 약 30 정도였다. 또한, 자유수면 및 선체 주변에서 더 조밀한 격자를 생성하였다. Lee and Lee (2014)는 심수 조건에서 선체의 자세를 고려하기 위하여 DFBI 기법을 적용하였다. 하지만, 천수 조건에서 수치 해석을 수행할 때는 무한수심으로 가정하지 않고, bottom과 선체 바닥면 사이의 유동을 고려해야 한다.

Ruiz et al. (2022)는 심수 조건에서 선체 주변을 감싸는 중첩 격자를 이용하였으며, 천수 조건에서는 morphing 기법을 이용하였다. 천수 조건에서 셋업을 변경한 이유는 천수 효과에 따라 트림 및 침하량의 변화가 커져 선체를 둘러싸고 있는 중첩 격자가 해석 영역 밖으로 돌출되는 문제를 피하기 위해서였다. 본 연구에서는 Ruiz et al. (2022)가 심수 조건에 적용했던 중첩 격자를

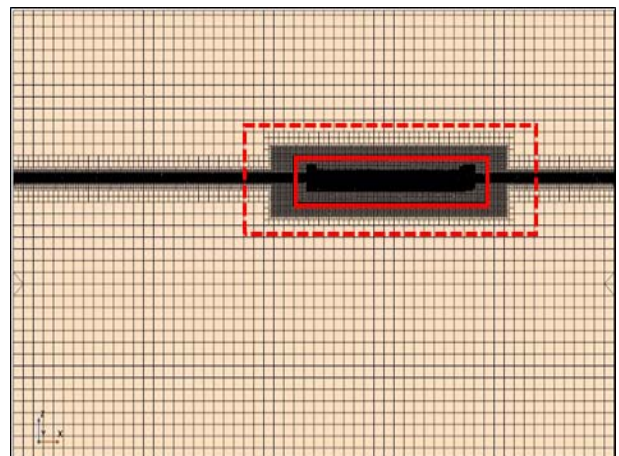


Fig. 4 Grid for oversight and refinement zone (Solid line : oversight, Dotted line : refinement zone)

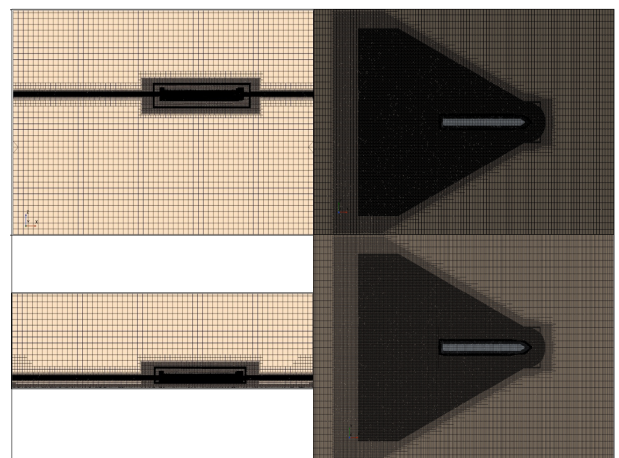


Fig. 5 Grids for side (left) and top section (right) (top : deep water condition, bottom : intermediate and shallow condition)

이용한 셋업을 제한수심 조건에 적용하더라도, 해석 영역의 돌출 문제가 h/T 1.5, 1.7인 경우 가장 높은 1, 2개 조건에서만 관찰되었기 때문에 다른 기법을 적용할 필요가 없다고 판단하였다. 따라서, Ruiz et al. (2022)가 적용했던 중첩 격자를 이용한 셋업을 모든 조건에 동일하게 적용하였다.

Zhang et al. (2020)은 중첩 격자와 배경 격자 사이에 overlapping region을 설정하였는데, 본 연구에서도 중첩 격자와 배경 격자 사이에 Fig. 4와 같은 refinement zone을 설정하였으며, 격자 크기는 중첩 격자 크기와 같도록 설정하고 배경격자로 갈수록 1.3배씩 증가시켰다. 이를 통해, 중첩 격자와 배경 격자가 교차하는 부분에서 압력, 속도 등의 물리량 내삽이 잘 이루어질 수 있었다.

선박의 속도에 따른 저항 성능의 변화를 분석하기 위하여, 실선 스케일 기준 3 knots부터 24 knots까지 수치 해석을 수행하였다. Toxopeus et al. (2013)의 연구를 따라, 수심 및 선속에 따라 초기 $Y+$ 값인 30을 유지할 수 있도록 경계층에서의 두께를 다르게 생성하였다. 또한, 제한 수심에서 선체 바닥면과 해저면 사이에서 발달하는 유동의 효과를 고려하기 위하여, 더 조밀한 격자를 적용하였다. 선체 바닥면의 $Y+$ 값은 선체 표면에서 적용한 $Y+$ 와 같은 값을 갖도록 하였다.

2.4 SWABE (Shallow Water and Bank Effects) JIP 경험식

전산유체역학 수치 해석을 통해 수심에 따른 천수 효과가 저항 성능에 미치는 영향은 저항 증가율의 형태로 비교, 분석하였다. SSPA가 주관하여 수행했던 SWABE JIP에서는 서로 다른 선종의 모형시험 결과를 토대로 천수 효과에 따른 저항 증가율 경험식을 제안한 바 있다. 제안된 경험식은 식 (2)와 같다. 여기서 R 은 제한 수심에서의 저항값, R_0 는 수심 조건에서의 저항값, F_{nh} 는 수심 프루드수(depth Froude number)를 가리킨다. $C_0, C_{11}, C_{12}, C_{13}$ 은 방형계수에 따라 테이블로 주어졌으며, 선형 보간하여 계산하도록 제안되었다 (Allenström, 2009).

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + F_1 F_{nh} \quad (2)$$

where,

$$F_1 = C_{11}\zeta + C_{12}\zeta^2 + C_{13}\zeta^3$$

$$\zeta = \frac{T}{h - T}$$

3. 수렴성 확인을 위한 계산 및 검증

3.1 격자 및 시간 간격 수렴성 시험

전산유체역학 수치 해석을 이용하여 선박의 속도, 수심에 따른 저항 성능의 변화를 추정하기 전, 설계 속도, 심수 조건에서 추정 한 저항값을 HSVA에서 수행한 저항 모형시험 계측값과 비교함으로써 격자, 시간 간격 및 셋업의 타당성을 확인하였다 (DSME,

2012). 특히, Zou and Larsson (2013) 연구 방법론을 참고하여, 격자 base size의 증감비율을 $\sqrt{2}$ 로 하는 수렴성 시험을 수행하였다. 격자 수렴성 시험 조건을 Table 3에 요약하였다. 이상적으로는 해석 격자의 크기가 무한히 작아짐에 따라 참값에 수렴해야 한다. 하지만, SIEMENS의 내부 보고서에서 중첩 격자를 이용한 수치 해석 시 수렴하지 않고, 진동하는 결과를 보이는 경우 격자 크기를 사용자의 판단에 따라 최적의 격자 크기를 선택해야 하는 경우도 있었다 (Peric, 2019). Fig. 6에서 보는 것처럼, 본 해석에서도 유사한 경향성이 관찰되어, 설계 속도, 심수 조건에서 모형 시험의 저항값과 0.06 % 오차를 보였던 격자 수 6백만 개 조건을 선택하였다.

Fig. 6에서 보는 것처럼, 모형시험은 심수 조건에서만 수행되었기 때문에, 제한 수심에서는 심수 조건에서 계산된 저항값과 경향성을 비교하는 목적으로 수치 해석이 수행되었다. h/T 1.7인 제한 수심에서는 Table 3의 2번 격자를 기준으로 해석하되, 선체 바닥면과 해저면 주변 격자 크기에 따른 수렴성 시험을 별도 수행하였다. Table 3에서 h_i 는 i 번째 격자 크기를 의미하며, h_1 은 가장 조밀한 격자계의 격자 간격을 나타낸다. 무한 수심에서 제한 수심으로 해석 영역이 감소하는 대신, 격자의 크기가 작아짐에 따라 심수 조건과 비교할 때 총 격자 수가 많은 경우도, 작은 경우도 모두 관찰되었다. 제한 수심에서 격자 수렴성 시험을 통해 선택된 조건의 총 격자 수는 7.3 백만 개였다.

시간 간격 크기에 대한 수렴성 시험은 앞에서 선택된 격자를 기준으로 수행되었으며, 상세 조건은 Table 4와 같으며, t_i 는 i 번째 시간 간격을 의미하고, t_1 은 가장 짧은 시간 간격을 나타낸다. 시간 간격의 크기가 가장 작은 0.001 초부터, 가장 큰 0.08초까지 5개 조건이었다. Fig. 7에서 보는 것처럼, 설계 속도, 심수 조건에서 모형시험의 저항값과 0.06 % 오차를 보였던 0.02초를 선택하였다. 다만, h/T 가 1.7인 제한 수심에서는 선체 바닥면과 해저면 주변에서 더 작은 크기의 격자를 적용함에 따라, 시간 간격을 0.01초로 선택했다.

Fig. 6과 7에서 격자 크기 및 시간 간격이 작아질수록 저항값이 수렴하다가, 가장 작은 격자와 시간 간격 조건에서 계산값이 증가함을 확인하였다. Zou and Larsson (2013)의 연구에서도 유사한 수렴성을 보였는데, 두 가지 가능성을 언급하였다. 첫째, 수

Table 3 Details of grid convergence test for deep sea and shallow water conditions

No.	1	2	3	4	5	6
Number of grids for deep water condition ($\times 10^6$)	13.5	8.2	6.0	3.9	2.2	1.4
Number of grids for intermediate and shallow water condition ($\times 10^6$)	9.5	7.3	5.1	4.3	-	-
h_i/h_1 ($1 \leq i \leq 6$)	1.0	1.189	1.414	1.682	2.0	2.378

Table 4 Details of time convergence test for deep sea and shallow water conditions

No.	1	2	3	4	5
Time-step [sec]	0.005	0.01	0.02	0.04	0.08
t_i/t_1 ($1 \leq i \leq 5$)	1	2	4	8	16

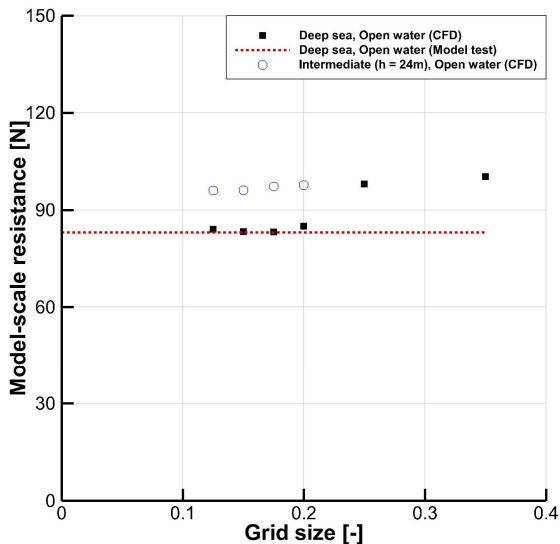


Fig. 6 Grid convergence test results for model-scale resistance under deep and intermediate water conditions

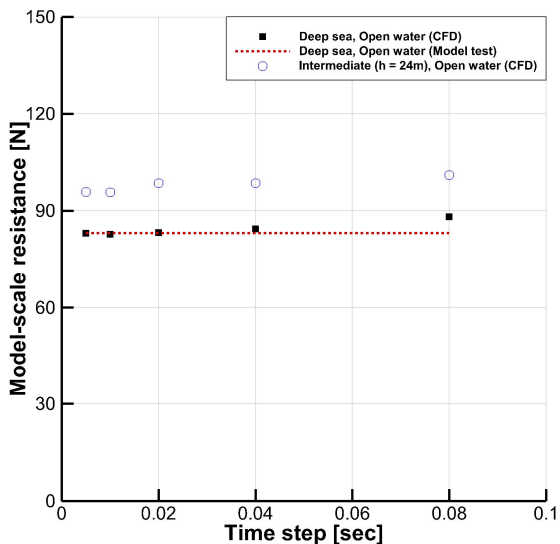


Fig. 7 Time step convergence test results for model-scale resistance under deep and intermediate water conditions

치 해석 조건에 따라 수렴성이 진동하는 형태로 나타날 수 있다. 둘째, 단일 격자계가 아닌 중첩 격자를 이용하여 수치 해석을 하는 경우, base size를 변경되더라도 모든 격자계가 같은 비율로

변경되지 않는다. 따라서, 본 연구에서 관찰된 것과 같은 수렴 특성을 보일 수 있다. 또한, 계산된 값의 증가량이 수렴값 기준 1 - 2 % 내의 작은 값으로, 그 영향성은 미미한 것으로 판단하였다.

3.2 전산유체역학 저항 해석 결과 검증

앞에서 설명한 것처럼, 설계 속도, 심수 조건에서 격자, 시간 간격 수렴성 시험을 통해 선택한 셋업을 기준으로, 심수 조건에서 선박의 속도에 따른 저항 해석을 수행한 결과를 Fig. 8과 같이 정리하였다. HSVA에서 수행되었던 모형시험에서 선박의 속도는 기준 실선 스케일 기준 19 knots부터 24 knots까지 0.5 knots 간격이었다 (모형 스케일 기준 1.58 m/s부터 2.00 m/s 까지). 전산 유체역학을 이용한 수치 해석은 수심에 따른 천수 효과가 저항 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 더 낮은 속도 구간을 포함할 필요가 있었다. 즉, 실선 스케일 기준 3 knots부터 9 knots까지 1 knot 간격, 9 knots에서 19 knots까지 2 knots 간격, 19 knots에서 24 knots까지 0.5 knots 간격으로 수치 해석을 계획하였다. 모형시험 결과와 직접 비교를 위하여, 본 논문에 삽입된 그림에서는 모형선 스케일로 표시하였다.

Fig. 8에서 보는 것처럼, 설계 속도의 모형 스케일 1.87 m/s (실선 스케일 22.5 knots)에서 수치 해석 결과가 모형시험 결과에 비해 0.06 % 크게 추정되어, 정량적 차이가 미미함을 확인할 수 있었다. 설계 속도를 기준으로 더 높은 속도에서는 수치해석 결과가 모형시험 결과에 비해 과소 추정하는 경향성, 더 낮은 속도에서는 과대 추정하는 경향성이 관찰되었으나 정량적인 차이는 미미하였다. 또한, 수치해석 결과와 모형시험 결과 모두 선박의 속도 제곱에 따라 저항값이 증가하는 경향성을 보이고 있어 통상적인 저항 모형시험, 시운전 결과의 경향성과 일치함을 확인할 수 있었다 (Behrendt and Kucharski, 1997).

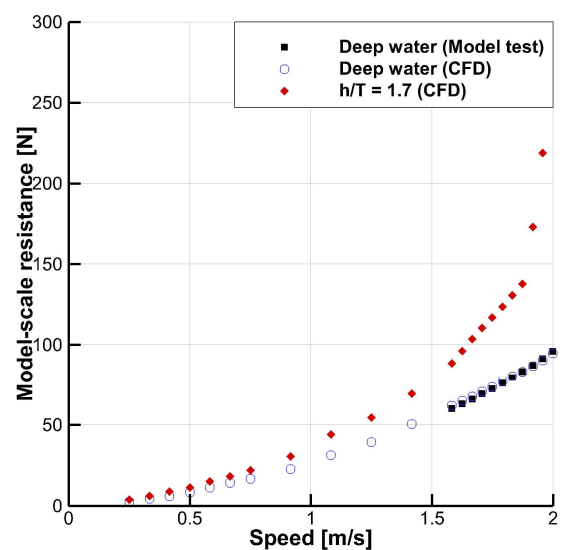


Fig. 8 Measured resistance for deep water condition and calculated resistance for deep and intermediate water conditions

수에즈 운하 표준 단면의 수심인 h/T 1.7인 조건에서 수치 해석된 저항값을 살펴보면, 심수 조건과 마찬가지로 속도의 제곱에 따라 증가하는 경향성을 보이고 있다. 다만, 심수 조건 저항값과 비교할 때, 저항값이 뚜렷하게 증가했음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 경향성은 Pacuraru and Domnisoru (2017)의 수치 해석 연구와 Vantorre (2003)의 총설에서 정리된 것과 일치했다. 특히, 고속 영역으로 갈수록 수심에 따른 천수 효과 때문에, 저항 증가율이 빠르게 증가함을 알 수 있다. 실선 스케일 24 knots (모형 스케일 2.00 m/s)에서 심수 조건의 저항과 비교할 때, 약 65 % 증가했다. 저항이 증가한 원인은 제한 수심에서 선체 바닥면과 해저면 사이 유동의 속도가 심수에서 속도보다 커지기 때문이다. 베르누이 방정식을 기준으로 예상컨대, 유동의 속도 증가에 따라 선체 하부의 압력이 낮아지고, 선박의 트림과 침하량이 증가하는 스쿼트(Squat) 현상이 일어난다. 수심에 따른 트림과 침하량의 변화는 Fig. 11, 12에서 상세히 살펴볼 예정이다.

4. 수치 해석 결과

4.1 해석 조건 (속도, 수심)

수심에 따른 천수 효과가 13,100 TEU급 대형 컨테이너선의 저항 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위한 해석 조건은 Table 5와 같다. PIANC (1992)에서 정의된 심수, 중간수심, 천수 조건을 고려하기 위해, h/T를 1.5부터 3.0까지 0.5 간격으로 선택하였다. 속도는 Fig. 8에서 선택했던 심수 조건과 같았다.

4.2 속도, 수심에 따른 저항 해석 결과

앞에서 심수 조건에서 수렴성이 확인된 격자, 시간 간격, 셋업을 적용하여 선박의 속도와 수심에 따른 저항 해석을 수행한 결과를 Fig. 9와 같이 도시하였다. Fig. 10은 Fig. 9에서 표시된 심수 조건 대비 제한 수심에서의 저항 증가량을 심수 조건의 저항값으로 나누어줌으로써, 그 증가 비율을 표기한 것이다. 단, h/T가 1.5와 1.7일 때, 각각 모형 스케일 속도 1.75 m/s, 1.87 m/s보다 높은 속도 조건에서 트림 및 침하량으로 선박의 중첩 격자가

Table 5 Test matrix for CFD analysis for water depth conditions

Full-scale properties	
h/T [-]	1.5, 1.7 (Suez Canal), 2.0, 2.5, 3.0, and Deep water
Full-scale speed [knots]	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 19.5, 20, 20.5, 21, 21.5, 22, 22.5, 23, 23.5, and 24
Model-scale speed [m/s]	0.25, 0.33, 0.42, 0.50, 0.58, 0.67, 0.75, 0.92, 1.08, 1.25, 1.42, 1.58, 1.62, 1.67, 1.71, 1.75, 1.79, 1.83, 1.87, 1.92, 1.96, and 2.00

가 해저면과 접하게 되는 문제를 관찰하게 되었다. 해당 결과는 타당하지 않은 것으로 판단하여, 분석에서 제외하였다. 전달 동력을 기준으로 생각해보면, 제한 수심에서 저항의 증가 때문에 선박이 최대 속도는 낮아질 수 밖에 없다. 따라서, 제외된 속도는 해당 수심에서 실제 운항할 수 없는 속도로 확인되어, 분석의 불필요함을 확인하였다.

Fig. 9에서 보는 것처럼, 선박의 속도 제곱에 따라 저항이 증가하는 경향성은 수심에 관계없이 공통적으로 관찰되었다. 다만, h/T가 작아짐에 따라 대상 선박의 저항이 더 크게 증가하고 있으며, Fig. 10에서 도시된 저항 증가율로 보면 그 차이는 뚜렷하다. 선박의 속도가 낮은 모형 스케일 0.25 m/s (실선 스케일 3 knots)부터 0.92 m/s (실선 스케일 11 knots)사이에서는 대체로 h/T가 작을수록 저항 증가율이 커지는 경향성을 볼 수 있으며, 속도가 낮을수록 저항 증가율이 커지는 경향성을 보이고 있다. 이러한 경향성의 주된 원인은 저항 증가율을 구할 때, 분자에 해당하는 천수 효과에 따른 저항값도 속도가 감소함에 따라 작아지고 있지만 분모에 해당하는 심수 조건의 저항값이 속도의 제곱에 따라 감소하고 있기 때문인 것으로 이해된다. 그 결과 저항 증가율이 선박의 속도가 낮아짐에 따라 더 작아지지 않거나 심지어 커지는 경향성을 보이게 된 것이다. 이와 같은 경향성은 Pacuraru and Domnisoru (2017)의 연구에서와 수심에 따른 바지선의 저항값 수치 해석 경향성과 일치했다.

Fig. 10에서는 수치 해석을 통해 추정된 저항 증가율 외에, SWABE JIP에서 서로 다른 선종의 모형시험을 토대로 제안한 식 (2)의 경험식 적용 결과를 추가로 도시하였다 (Allenström, 2009). 앞서 전산유체역학 수치 해석의 저항 증가율 경향성과 달리, SWABE JIP에서 제안한 경험식으로부터 얻은 저항 증가율은 선박의 속도와 비례함을 알 수 있다. SWABE JIP에서는 대형 유조선, LNG Tanker, 컨테이너선 등 몇 가지 선박에 대해서 3개의 선속에서 수심에 따른 저항시험을 수행했고, 속도와 선형 관계로 가정된 경험식을 기반으로 회귀 분석했기 때문이다.

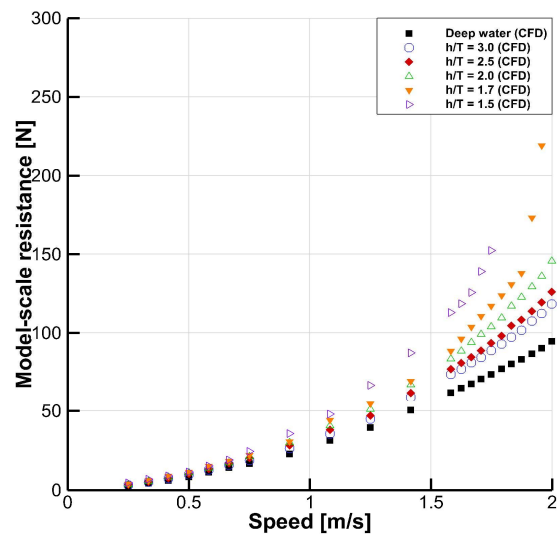


Fig. 9 Estimated resistance according to h/T

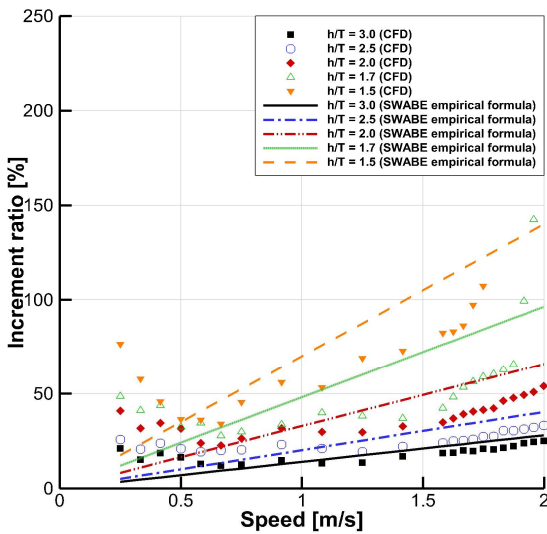


Fig. 10 Estimated increment ratio of resistance according to h/T

수치 해석 결과에서는 모형 스케일 0.92 m/s (실선 스케일 11 knots) 이상에서는 속도가 높아질수록 저항 증가율 역시 증가하는 경향성을 확인할 수 있다. 단, h/T가 작아질수록 그 증가율은 급격하게 커지고 있다. 작은 h/T 조건에서 저항 증가율이 급격하게 증가하는 결과는 수치 해석의 불안정성이 일부 반영된 것으로 생각한다. 또한, 전달 동력을 고려할 때 운항이 불가능한 속도 영역으로 특별한 의미를 찾을 필요는 없었다.

SWABE JIP 경험식에서도 전산유체역학 수치 해석에서 관찰한 것과 같은 경향성은 확인할 수 있으나, 수치해석 결과와 비교할 때 더 크게 추정하고 있었다. 따라서, 모형시험 전, 또는 전산유체역학을 이용한 수치해석 전 초기 검토에 마진을 고려하여 보수적인 추정을 하는데 경험식을 이용 가능하나, 정량적인 측면이나, 선박의 속도 증감에 따른 상대 비교 시 주의해야 할 것으로 판단 된다.

Fig. 9, 10에서 관찰된 h/T 감소에 따른 저항 증가의 원인을 살펴보기 위해 수심 및 선속에 따른 트림과 침하량을 Fig. 11, 12에 도시하였다. 선박의 속도가 높아짐에 따라 트림은 빠르게 증가하고, 침하량은 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, h/T가 감소함에 따라 그 크기의 변화량 또한 뚜렷하게 증가하고 있다. (단, 일부 조건에서 속도 크기에 따른 트림의 대소 관계가 바뀌는 경우가 있는데, 수치 해석된 결과를 후처리하는 과정에서 시간 평균하는 구간 선택에 따른 오차로 이해된다.) 이러한 경향성은 Duarte et al. (2016)의 연구에서 관찰된 특징과 같다. 해당 연구에서는 방형계수가 0.7 보다 큰 선박에서 천수 효과에 따라 선수 트림이 발생하며, 0.7 미만인 선박에서는 선미 트림이 발생한다고 주장하였다. 이와 같은 현상은 천수 효과에 따라 선미부의 접수 표면적이 선수부의 접수 표면적보다 크기 때문에, 더 큰 압력 저항이 나타났기 때문이라고 생각한다. 선박의 속도가 높아짐에 따라 트림과 침하량이 빠르게 증가함을 알 수 있고, 접수 표면적 또한 크게 증가하여 저항 증가율이 빠르게 커진 것으로 이해된다.

앞서 언급했던 천수 효과에 따른 선체 주위의 압력 변화를 살펴보기 위하여, Fig. 13, 14에서는 h/T에 따라 선체 바닥면에서의 압력 분포를 비교하였다. 압력 분포는 무차원화된 C_p 값을 이용하였으며, $\frac{P}{0.5\rho U^2}$ 로 정의하였다. 여기서, P는 선체에 작용하는 압력을, ρ 는 물의 밀도 그리고 U는 선속을 의미한다.

수심 조건에 따른 압력 분포 분석을 수행하되, 실제 수에즈 운하 통과 속도 범위를 고려한 속도 조건 (실선 스케일 6 knots, 모형 스케일 0.5 m/s)을 선택한 후 속도 차이에 따른 압력 분포를 가장 뚜렷하게 볼 수 있는 가장 높은 속도 조건 (실선 스케일 21 knots, 모형 스케일 1.75 m/s)을 선택하였다. Fig. 13에서 보는 것처럼, h/T가 1.5인 조건에서는 모형 스케일 1.75 m/s (실선 스케일 21 knots)를 초과한 해석 결과를 분석에서 제외했기 때문

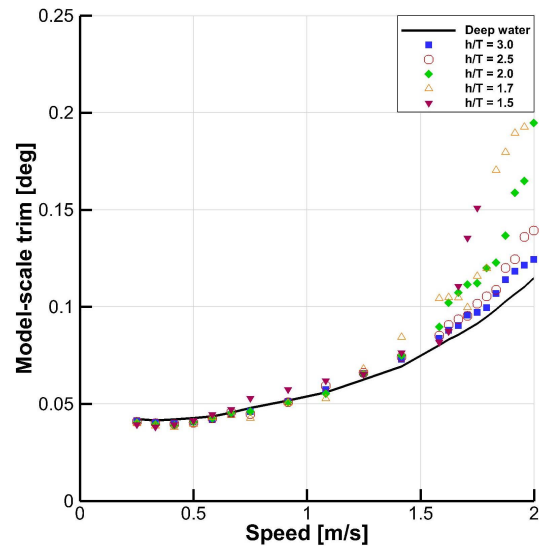


Fig. 11 Estimated trim according to h/T

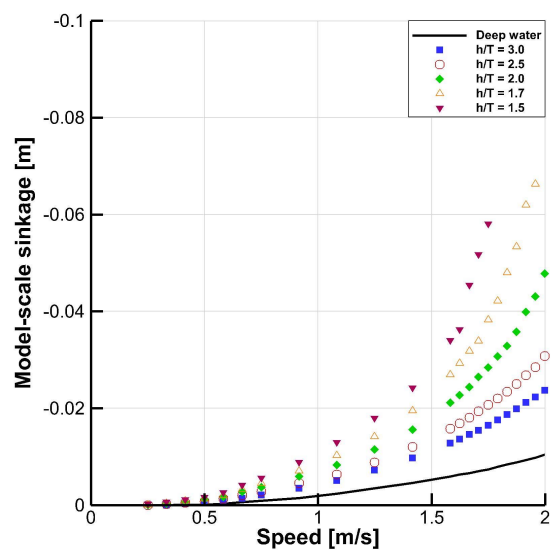


Fig. 12 Estimated sinkage according to h/T

에, 모형 스케일 1.75 m/s (실선 스케일 21 knots)가 가장 높은 속도였다. Fig. 14에서는 모형 스케일 0.5 m/s (실선 스케일 6 knots)에서의 압력 분포를 도시하여, 비교하였다.

Fig. 13, 14에서는 h/T 감소함에 따라 선체 바닥면의 압력이 뚜렷하게 감소함을 알 수 있다. 특히, 모형 스케일 1.75 m/s (실선 스케일 21 knots)에서는 압력 변화가 모형 스케일 0.5 m/s (실선 스케일 6 knots)조건에 비해 뚜렷하게 차이남을 알 수 있다. h/T 가 작아질수록, 선미부의 압력이 더 크게 감소함을 확인할 수 있다. 선체 하부의 압력 차이는 Fig. 11, 12에서 설명한 트림 및 침하량 변화와 일치한다. 또한, 모형 스케일 0.5 m/s (실선 스케일 6 knots) 조건에서 압력의 변화는 모형 스케일 1.75 m/s (실선 스케일 21 knots)조건에 비해 작는데, 압력 변화가 작은 만큼 저항 증가분 역시 작은 것을 이해할 수 있다.

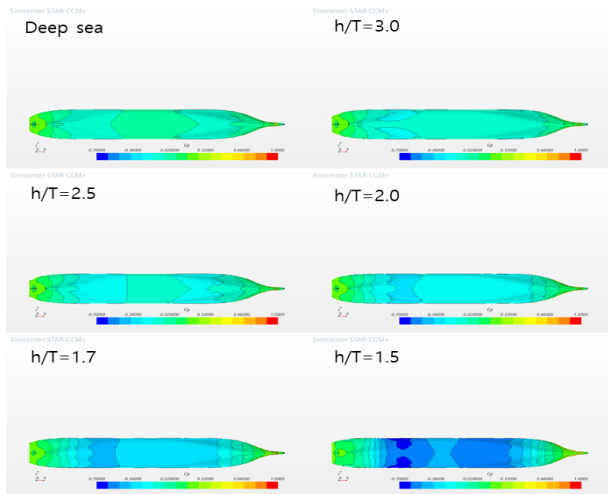


Fig. 13 Pressure distributions on the hull surface according to h/T at model-scale speed of 1.75 m/s (full-scale speed of 21 knots)

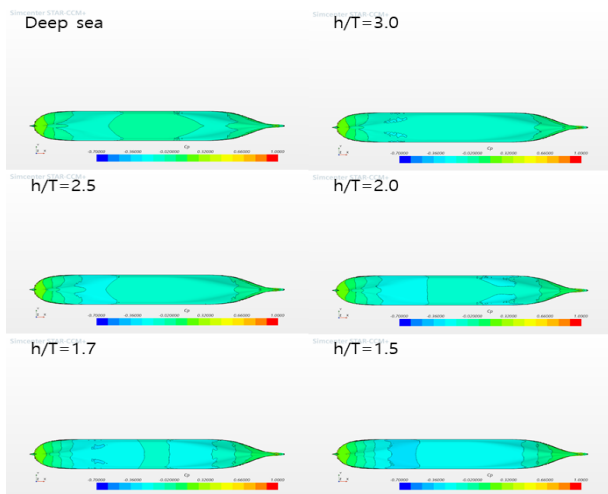


Fig. 14 Pressure distributions on the hull surface according to h/T at model-scale speed of 0.50 m/s (full-scale speed of 6 knots)

4.3 수심에 따른 전달 동력 추정

Fig. 15에서는 수심에 따른 선박의 속도-전달 동력 관계를 도시하였다. 실선 스케일로 확장한 전달 동력으로 표시했기 때문에, 모든 축계를 실선 스케일 값으로 표기하였다. 실선 저항 추정 방법으로는 HSVA에서 적용했던 ITTC 1957 방법을 이용하였다 (ITTC, 1978; DSME, 2012). 다만, 전달 동력 추정을 위해서는 저항 시험 또는 저항 해석을 통해 추정된 추력 감소 계수, 준 추진 효율이 필요하다. 실선 스케일 19 knots에서 24 knots까지는 모형시험을 통해 얻은 추력 감소 계수, 준 추진효율을 이용하여 전달 동력을 추정하였으며, 실선 스케일 19 knots 미만의 속도에서는 선형 회귀분석(속도-추력 감소 계수, 속도-준 추진효율)을 통해 외삽하여 추정된 값을 이용하여 전달 동력을 추정하였다. 모형시험을 수행한 속도 구간에서 속도에 따른 추력 감소 계수, 준 추진효율이 선형 관계를 보였기 때문에 위 방법을 선택했지만, 전산유체역학을 이용한 저항 해석을 통해 외삽의 불확실성을 해소할 필요가 있다.

설계 속도, 심수 조건에서 모형시험을 기준으로 추정된 전달 동력과 전산유체역학 해석 결과를 기준으로 추정된 전달 동력의 차이는 약 0.02 % 차이로, 그 차이가 미미함을 확인하였다. Fig. 8에서 본 것처럼, 설계 속도를 기준으로 속도가 작은 구간에서는 수치 해석이 저항값을 과대 추정했고, 속도가 높은 구간에서는 과소 추정을 했기 때문에 전달 동력에서도 같은 경향성이 나타났다.

실선의 전달 동력을 기준으로 h/T 가 3.0, 2.5, 2.0, 1.7, 1.5 인 해역에서 실선 스케일 최대속도 21.5, 21.0, 20.0, 19.0, 17.0 knots (모형 스케일 기준 1.79, 1.75, 1.67, 1.58, 1.42 m/s)로 운항이 가능할 것으로 보인다. 전달 동력 기준으로 볼 때, 검토된 h/T 조건에서 설계 속도 대비 약 10 - 30% 정도의 최대 속도 감소됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 운항 계획을 수립하거나, 운항 안전성을 평가하는데 있어 저항 증가에 따른 선박의 속도 감소를 반영할 필요가 있다고 생각한다.

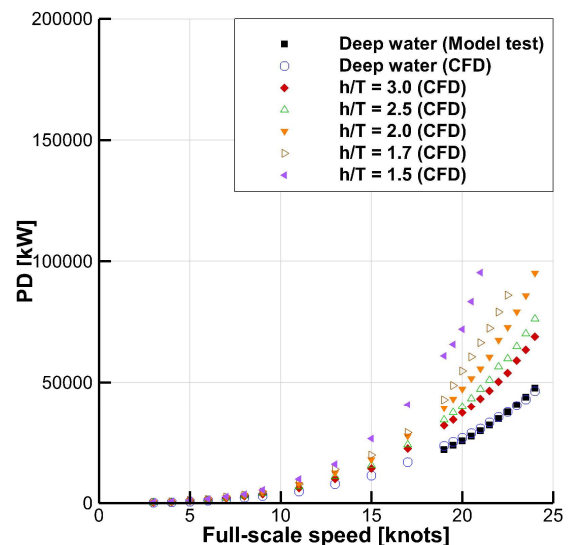


Fig. 15 Estimated delivered power according to h/T

5. 결론

본 논문에서는 전산유체역학 수치 해석을 이용하여, 수심에 따른 천수 효과가 대형 컨테이너선의 저항 성능에 미치는 영향을 분석하고자 했다. 특히, 심수 조건의 모형시험 결과 비교를 통해 검증한 셋업을 적용했고, SWABE JIP 경험식과 비교를 통해 특징을 분석할 수 있었다. 본 연구를 통해 다음과 같이 세 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 전산유체역학 수치 해석을 통해 h/T 가 감소함에 따라 선박의 저항이 빠르게 증가함을 확인하였다. 천수 효과에 따라 선체 바닥면과 해저면 사이에 유동의 속도가 증가하고, 압력이 감소함에 따라 트림과 침하량의 크기가 급격하게 커지는 경향성이 나타났다. 그 결과 접수 표면적 또한 증가할 것으로 예상되는데, 이러한 경향성은 저항 증가율 곡선의 증가와 유사했다.

둘째, 수치 해석을 통해 추정된 저항 증가율 곡선과 SWABE JIP 경험식 결과를 비교하고, 각각의 차이를 확인할 수 있었다. 저속 구간을 제외하고는 경험식을 이용했을 때 수치 해석 결과에 비해 더 큰 저항 증가율을 보이고 있으며, h/T 가 커짐에 따라 그 차이는 더 커지고 있었다. 경험식은 선박의 속도와 선형관계를 가정하여 제안되었기 때문에, 전산유체역학 수치 해석 결과와 다른 경향성을 가짐을 이해할 수 있었다. 따라서, 경험식을 모형시험 전, 또는 전산유체역학을 이용한 수치해석 전 초기 검토에 마진을 고려하여 보수적인 추정을 하는데 제한적으로 이용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

셋째, 수치 해석 결과를 기준으로 전달 동력을 추정했을 때, h/T 1.5 - 3.0 구간에서 최대 속도를 기준으로 선박의 속도가 10 - 30 % 정도 감소함을 확인했다. 따라서, 운항 계획을 수립하거나, 운항 안전성을 평가하는데 있어 저항 증가에 따른 선박의 속도 감소를 반영할 필요가 있음을 인지할 수 있었다. 이는 대형 컨테이너선의 운항 안전성 평가에 관한 후속 연구의 시작점이 될 것이다.

향후에는 전산유체역학을 이용한 제한 수심에서 저항 해석을 수행하고, 저항 해석결과와 연계된 저항, 저항 분석을 수행하고자 한다. 또한, 전산유체역학 수치 해석 기법을 적용하여, 자유항 주해석을 수행한 후, 저항, 저항 시험 기반의 추정값과 비교함으로써 전산유체역학 해석 기법에 따른 특징을 분석할 계획이다. 마지막으로, 수에즈 운하로 대표되는 제한 수로를 통과하는 대형 컨테이너선의 운항 안전성 평가 기법 개발과 연계함으로써, 선박의 운항 안전성 향상을 도모하고자 한다.

후 기

이 논문은 2022년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다 (과제명: 천수 및 제한수로 통과 선박의 운항안전성 평가).

References

- Allenström, B., 2009. *Joint Industrial Project SWABE Compilation of SSPA Report 4006 4341-1 to 4006 4341-14*, SSPA (SWABE Consortium Confidential Report).
- Behrendt, C. and Kucharski, T. 1997. Comparison of model test with ship sea trial results for a given vessel series, *Transaction on the Built Environment*, 24, pp.277-284.
- DSME, 2012. *Model Tests for a 13,100 TEU Container Vessel (REPORT WP 170/11)*, HSVA (Confidential Report).
- Duarte, H.O., Lopez Drogue, E., Martins, M.R., Pereira, P. S., Lutzhoft, M., Pereira, P.S. and Lloyd, J., 2016. Review of practical aspects of shallow water and bank effects. *International Journal of Maritime Engineering*, 158, pp.177-186.
- ITTC, 1978. *ITTC Report of performance committee: 15th ITTC*, Hague, Netherlands, September 1978, pp.359-392.
- Jebsen, J.J. and Papakonstantinou, V.C., 1997. *Evaluation of the Physical Risk of Ship Grounding*, M.Sc., Massachusetts Institute of Technology.
- Lee, S.B. and Lee, Y.M., 2014. Statistical reliability analysis of numerical simulation for prediction of model-ship resistance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. 51(4), pp.321-327.
- Meng, Q. and Wan, D., 2016. Numerical simulations of viscous flow around the obliquely towed KVLCC2M model in deep and shallow water. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. Vol.28(3), pp.506-518.
- Pacuraru, F. and Domnisoru, L. 2017. Numerical investigation of shallow water effect on a barge ship resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 227, 012088.
- Peric, M., 2019. Problem with small time steps in applications with large scale variation. *Siemens Internal Report*.
- PIANC., 1992. *Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairway in harbours* (report of Working Group no.20 of Permanent Technical Committee II), General Secretariat of PIANC, Brussels, Belgium.
- Ruiz, N., Verma, B., Leal, L., and Garcia, M., 2022. Shallow water resistance estimation for a riverine light patrol boat using computational fluid dynamics. *Ship Science & Technology*, 15(30). pp.47-57.
- Toxopeus, S.L., Simonsen, C.D. and Guilmineau, E., 2013. Investigation of water depth and basin wall effect on KVLCC2 in manoeuvring motion using viscous-flow calculations. *Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*. 18, pp.471-496.

Vantorre, M. 2003. Review of practical methods for assessing shallow and restricted water effects. *International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM 2003)*, Kanazawa, Japan.

Zhang, X., Lin, Z., Mancini, S., Li, P., Liu, D., Liu, F., and Pang, Z., 2020. Numerical investigation into the effect of damaged openings on ship hydrodynamics by the overset mesh technique. *Journal of Marine Science and Engineering*. 8(1):11.

Zou, L. and Larsson, L., 2013. Computational fluid dynamics (CFD) prediction of bank effects including verification and validation. *Journal of Marine Science and Technology*, 18, pp.310–323.

Zou, L., Larsson, L., Delefortrie, G., and Lataire, E., 2011. CFD prediction and validation of ship–bank interaction in a canal, *2nd international conference on ship manoeuvring in shallow and confined water*, Trondheim, Norway.



이 선 규



유 영 준



김 진 해