



# CFD 기반 저항 해석의 격자 민감도 정량 평가

안준범<sup>1</sup>·김백현<sup>1</sup>·이상봉<sup>1,†</sup>·심민경<sup>2</sup>·손석호<sup>3</sup>·김정중<sup>2</sup>  
동아대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>2</sup>  
현대중공업파워시스템<sup>3</sup>

## Quantitative Assessment of Grid Sensitivity in CFD-Based Self-Propulsion Simulation

Jun Beom An<sup>1</sup>·Baek Hyun Kim<sup>1</sup>·Sang Bong Lee<sup>1,†</sup>·Min Gyeong Sim<sup>2</sup>·Seok Ho Son<sup>3</sup>·Jung Joong Kim<sup>2</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-A University<sup>1</sup>  
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO)<sup>2</sup>  
Hyundai Power System<sup>3</sup>

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.

This study performs resistance and self-propulsion simulations for four ship types using computational fluid dynamics(CFD) and evaluates the impact of grid resolution on prediction accuracy and numerical convergence. A total of 56 cases were analyzed by applying coarse, medium, and fine mesh systems. Convergence behavior was assessed based on the Grid Convergence Index(GCI) methodology. Among the 56 cases, 42 were included in the GCI analysis, showing order of convergence(p) greater than 1.5 and grid uncertainty( $U_G$ ) below 3% in most conditions. In particular, when over 10 million cells were used, simulation results showed consistent trends across different speeds within the same hull form, indicating robust convergence and reliability. Although a few cases were excluded due to irregular convergence behavior, their impact on the overall tendency was negligible. The findings provide practical guidelines for grid arrangement and uncertainty quantification in CFD-based ship performance predictions.

**Keywords** : Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), Self-propulsion(자항), STAR-CCM+, Grid sensitivity(격자 민감도)

### 1. 서론

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 활용한 저항 해석은 수치 해석 기법과 전산 처리 성능의 발전에 따라, 모형시험 대비 시간과 비용 면에서 효율적인 선박 성능 평가 방법으로 주목받고 있다. 최근에는 병렬 연산과 전산기의 발달로 인해, 계산량이 많고 유동 특성이 복잡한 저항 해석에서도 실용적인 수준의 해석이 가능해지고 있다. 이러한 기술적 기반은 반복적인 설계 변경과 다양한 조건 검토가 요구되는 초기 설계 단계에서 특히 유용하게 작용한다. 실제로 저항 해석에 앞서 수행되는 저항 해석과 프로펠러 단독 성능 해석은 이미 설계 현업에 적극적으로 활용되고 있다.

CFD 기반 선박 성능 예측 중 저항 해석은 다양한 연구를 통해 모형시험과 유사한 수준의 결과를 꾸준히 도출해 왔으며, 수치 해석 기법으로서의 신뢰성을 확보한 것으로 평가되고 있다. 이러

한 성과를 바탕으로 해석 과정에 대한 기본적인 접근법이나 절차는 실무에서 참고할 수 있는 기준으로 활용될 정도로 정립되고 있다. 반면, 저항 해석은 상대적으로 공개된 연구 결과가 부족하여 해석 기법의 신뢰성과 일반화 가능성을 체계적으로 입증하기에는 아직 한계가 있다. 이는 저항 해석이 저항 해석이나 프로펠러 단독 성능 해석보다 기술적으로 더 높은 난이도를 요구하기 때문이다.

저항 해석은 선체와 프로펠러 간의 복잡한 상호작용을 정밀하게 모사해야 하므로, CFD 해석 중에서도 기술적으로 높은 난이도를 요구한다. 특히, 프로펠러 후류의 비정상 유동, 선체-프로펠러 간 상호작용, 자유수면 효과 등 다양한 물리 현상을 동시에 고려해야 하며, 이로 인해 해석 결과의 재현성과 신뢰성 확보가 더욱 어려워진다. 실제로 동일한 선형과 조건에서도 기관마다 해석 결과에 차이가 발생한 사례가 보고된 바 있으며, 이는 저항 해석이 민감하고 복잡하다는 것을 보여주는 사례이다

(Hino et al., 2020).

지금까지 수행된 CFD 기반 자항 해석 연구들은 KCS(KRISO container ship), KVLCC2(KRISO very large crude carrier 2), DTMB 5415(David Taylor model basin), JBC(Japan bulk carrier) 등과 같은 소수의 공개된 표준 선형을 중심으로 수행되어 왔다(Carrica et al., 2011; Kim et al., 2005; Jin et al., 2019; Hoa, 2024). 기존 연구들은 주로 특정 흘수나 선속 등 정해진 조건에서 모형시험 결과와의 비교를 통해 해석 기법의 타당성을 검토하고, 이러한 비교를 바탕으로 해석 결과의 신뢰성을 평가하는데 활용되었다. 다만, 해석에 사용된 선형, 선속, 흘수 등 운항 조건이 제한적이었기 때문에, 연구 결과를 다양한 상황에 일반화하는 데에는 한계가 있다. 따라서 체계적이고 표준화된 해석 절차를 정립하기 위해서는, 보다 다양한 선형과 운항 조건을 고려한 추가적인 수치 해석 연구가 필요하다. 이는 다양한 조건에서의 수치 해석 결과를 종합적으로 분석하고 정리하는 작업이 갖는 중요성을 뒷받침한다.

또한, CFD 해석의 신뢰도를 높이기 위해서는 해석 결과에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 불확실성 평가가 수행되어야 한다. 대표적인 요인으로는 난류 모델, 반복 계산의 수렴성, 시간 간격, 격자 구성에 따른 수치적 불확실성이 포함된다. 이 중 격자 설정은 해석 결과에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이자, 사용자가 직접 제어할 수 있는 변수이다. 이러한 특성으로 인해, 격자 불확실성 분석은 CFD 신뢰도 평가를 위한 효과적인 수단으로 널리 활용되고 있다. 이 방법은 해석 결과가 격자 설정에 따라 어떻게 달라지는지를 정량적으로 분석함으로써, 해석 신뢰도를 향상시키는 데 기여한다. 항공역학 분야에서는 Roache (1998)가 제안한 Grid Convergence Index(GCI)가 표준 절차로 자리잡았으며, Roy (2005)는 이를 다양한 차수의 수치 기법에 적용하여 활용 범위를 확장하였다. CFD 전반에서는 Eça and Hoekstra (2014)가 격자 수렴성 기반의 수치 불확실성 정량화 절차를 정립하였고, 선박 저항 해석 분야에서는 Song et al. (2021)가 다양한 격자 크기와 시간 간격에 따른 수치 오차를 평가하여 해석 결과의 신뢰도를 향상시키고자 하였다. 이러한 연구들은 격자 수렴성 검토가 해석 결과의 일관성과 신뢰도 확보에 실질적으로 기여할 수 있음을 보여준다. 반면, 자항 해석에서는 격자 불확실성 분석이 적용된 사례가 상대적으로 적어, 격자 구성에 따른 해석 결과의 민감도를 이해하고 정량적으로 평가하는 데 참고할 수 있는 자료는 아직 충분하지 않다.

이에 본 연구는 다양한 선종과 운항 속도 조건에서 CFD 기반 자항 해석을 수행하고, 격자 밀도의 차이가 해석 정확도에 어떤 영향을 미치는지를 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 격자 구성 수준을 단계적으로 변화시키며 해석을 수행하고, 그 결과를 모형시험과 비교함으로써 해석 신뢰도를 평가하였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로, 향후 자항 해석 수행 시 실질적으로 활용 가능한 격자 구성 기준을 제시하고, 참고할 수 있는 실용적인 가이드라인을 마련하는 것을 목표로 한다.

## 2. 수치 기법

### 2.1 해석 대상 선박 및 프로펠러

본 연구에서는 다양한 선종과 운항 조건에서의 수치 해석 성능을 평가하기 위해 총 네 척의 선박을 해석 대상으로 선정하였다. 대상 선형은 KSUPRAMAX-60K Bulk Carrier (BC), STD 2700TEU Feeder Container Carrier (CC), 13K Methanol PC Tanker (MPC), STD 45K LPG Carrier (LPGC)로 구성된다. 이들 선박은 배수톤수, 형상, 전장비 등에서 서로 다른 특성을 가지며,

Table 1 Principal particulars of KSUPRAMAX-60K Bulk Carrier

Category	Item	Full-scale properties
Hull	Lpp [m]	196.0
	B [m]	36.0
	T [m]	11.2
	DISV [m <sup>3</sup> ]	64894
	Scale ratio	24.0
	Fr	0.0929~0.1742
Propeller	Dp [m]	6.0
	Turning direction	R.H.

Table 2 Principal particulars of STD 2700TEU Feeder Container Carrier

Category	Item	Full-scale properties
Hull	Lpp [m]	192.0
	B [m]	32.2
	T [m]	10.0
	DISV [m <sup>3</sup> ]	40181
	Scale ratio	27.2
	Fr	0.1653~0.2479
Propeller	Dp [m]	6.8
	Turning direction	R.H.

Table 3 Principal particulars of 13K Methanol PC Tanker

Category	Item	Full-scale properties
Hull	Lpp [m]	122.0
	B [m]	21.0
	T [m]	8.55
	DISV [m <sup>3</sup> ]	17134
	Scale ratio	19.2
	Fr	0.1613~0.2200
Propeller	Dp [m]	4.8
	Turning direction	R.H.

Table 4 Principal particulars of STD 45K LPG Carrier

Category	Item	Full-scale properties
Hull	Lpp [m]	184.7
	B [m]	30.4
	T [m]	9.5
	DISV [m <sup>3</sup> ]	39250
	Scale ratio	26.8
Propeller	Fr	0.1567~0.2169
	Dp [m]	6.7
	Turning direction	R.H.

저속 및 고속 운항 조건을 모두 포함하고 있어 다양한 해석 조건에서의 경향성 비교에 적합하다. 대상 선박과 프로펠러에 대한 주요 제원은 Table 1~4에 나타내었으며, CFD 해석에 사용된 모형선 형상은 모형시험에 사용된 형상과 동일하게 구현하였다.

### 2.2 해석 조건 및 계산 영역

본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어인 STAR-CCM+ (ver. 17.06)을 이용하여 수치 해석을 수행하였으며, 해석 목적에 따라 계산 영역 및 경계 조건을 구분하여 설정하였다. 저항 및 저항 해석에 사용된 계산 영역은 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었으며, 전체 도메인 크기는 수선간 길이(Lpp)를 기준으로 전후 5Lpp, 상하 2~3Lpp, 좌우 각각 3Lpp의 크기로 구성하였다. 두 해석은 동일한 도메인 구성을 기반으로 하되, 대칭 조건의 적용 여부에 차이가 있다. 저항 해석에서는 계산 효율을 고려하여 중심면 기준 반쪽 해석을 수행하였으며, 저항 해석에서는 프로펠러 후류의 비대칭 유동 특성을 반영하기 위해 전쪽 해석을 수행하였다.

각 해석에 적용된 경계 조건은 Table 5에 제시하였다. 계산 영역의 입구, 상부 및 하부에는 모두 속도 입구(velocity inlet) 조건을 적용하였으며, 출구에는 압력 출구(pressure outlet)를 설정하였다. 좌우 측면과 중심면은 대칭 경계 조건(symmetry plane)으로 설정하였다.

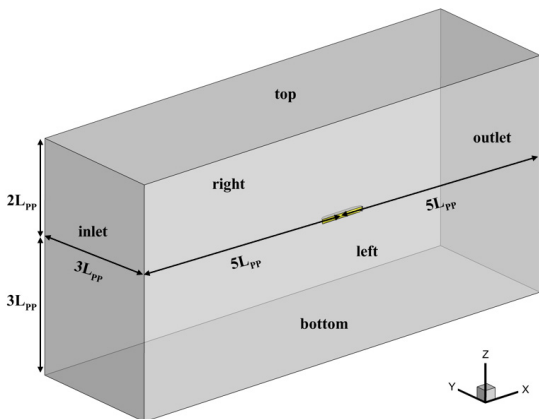


Fig. 1 Computational domain for resistance simulation

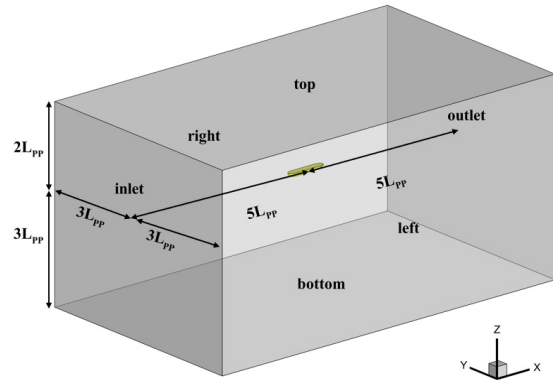


Fig. 2 Computational domain for self-propulsion simulation

Table 5 Boundary conditions for resistance and self-propulsion simulations

Boundary name	Boundary condition
inlet	Velocity inlet
outlet	Pressure outlet
top	Velocity inlet
bottom	Velocity inlet
right	Symmetry plane
left	Symmetry plane

### 2.3 지배 방정식 및 수치 해석 기법

본 연구는 비압축성 다상 난류 유동을 해석 대상으로 하였으며, 지배 방정식으로는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하였다. 해당 방정식은 시간 평균화된 연속 방정식과 운동량 보존 방정식으로 구성되며, 점성 및 비점성 효과를 함께 반영할 수 있다. 난류 해석에는 k- $\omega$  SST 모델을 적용하였다. 자유 수면은 VOF (volume of fluid) 기법을 통해 모사하였으며, 계면에서의 수치 확산을 억제하고 형상 재현의 정확도를 높이기 위해 HRIC (high resolution interface capturing) 차분 기법을 함께 적용하였다. 저항 해석과 저항 해석 모두 자유수면을 포함한 조건으로 수행하였다.

저항 해석에서는 선체의 병진 운동 중 heave 및 pitch 두 자유도만을 고려하여 격자계를 직접 이동시키는 DFBI (dynamic fluid-body interaction) 기법을 사용하였다. 프로펠러 단독 성능 해석은 고정된 격자계 내에서 회전 좌표계를 적용하는 MRF (moving reference frame) 방식으로 수행되었으며, 저항 해석에서는 해석 단계에 따라 MRF 기법과 슬라이딩 격자(sliding mesh) 기법을 혼용하였다. 초기 단계에서는 계산 효율을 고려하여 MRF 기법을 적용하였으며, 이후에는 보다 정밀한 비정상 회전 유동 모사를 위해 슬라이딩 격자 기법으로 전환하였다. 이러한 구성을 통해 ITTC (2011)에서 권고한 프로펠러 회전당 최소 200개 시간 스텝 기준을 만족하면서도, 계산 효율성과 해석 정밀도 간의 균형을 확보할 수 있었다. 시공간 차분은 상용 CFD 소프트웨어의

기본 설정을 바탕으로 구성하였으며, 시간 차분은 내제적 방식(implicit scheme)으로 수행되었다. 해석 조건에 따라 저항 및 저항 해석은 비정상 상태(unsteady), 프로펠러 단독 성능 해석은 정상 상태(steady) 조건으로 수행되었다. 시간 간격( $\Delta t$ )은 해석 조건 및 난류 모델의 복잡성을 고려하여 설정하였으며, ITTC (2011)의 권고 기준을 준용하였다. 저항 해석의 경우, 비정상 계산에서는 시간 간격을 0.005~0.01L/V 범위로 설정하는 것이 일반적으로 권장되며, 복잡한 난류 모델을 사용하는 경우에는 보다 작은 값인 0.001~0.0025L/V 수준이 적절한 것으로 제시되어 있다(ITTC, 2011). 본 연구의 저항 해석에서는 해석 선속에 따라  $\Delta t=0.001\sim 0.0025L/V$  범위 내에서 시간 간격을 설정하였다.

저항 해석에서는 해석 단계별로 고정된 회전 각도( $^{\circ}/\text{step}$ )를 기준으로 시간 간격을 설정하였다. 초기에는 계산 효율성을 고려하여 MRF 기법을 사용하여 유동장을 수렴시킨 후, 슬라이딩 격자 기법으로 전환하여 보다 정밀한 비정상 회전 유동 해석을 수행하였다. 실제 해석은 한 시간 스텝마다 프로펠러가 10 $^{\circ}$ , 5 $^{\circ}$ , 1 $^{\circ}$ 씩 회전하도록 구성한 단단계 방식으로 진행되었으며, 단계가 진행될수록 회전 각도를 감소시켜 해상도를 점진적으로 향상시켰다. 최종 물리량의 평균값은 해상도가 가장 높은 1 $^{\circ}/\text{step}$  조건에서 산정하였으며, 이는 ITTC (2011)에서 권장하는 회전당 최소 200개 시간 스텝 기준을 만족하도록 구성하였다.

본 연구에 사용된 격자계는 STAR-CCM+에서 제공하는 트리머와 프리즘 층 격자를 조합한 비정렬 격자로 구성하였으며, 해석 영역의 유동 특성과 계산 효율을 고려하여 각기 다른 격자 유형을 적용하였다. 저항 해석에서는 비교적 단순한 유동장을 효율적으로 처리하기 위해 비정렬형 트리머 격자를 사용하였다. 반면, 프로펠러 단독 성능 해석과 저항 해석에서는 회전 영역과 비회전 영역이 모두 포함되며, 회전 영역에는 유동이 복잡하고 격자 형상의 유연성이 요구되므로 다면체(polyhedral) 격자를, 비회전 영역에는 트리머 격자를 각각 적용하였다. 두 영역 간의 연결은 STAR-CCM+의 인터페이스 기능을 통해 경계면을 설정하는 방식으로 구성하였다. 저항 해석에서는 선체 주변에 저항 해석과 동일한 격자 구성을, 프로펠러 회전 영역에는 단독 성능 해석과 동일한 설정을 적용하여 격자 구조의 일관성을 확보하였다.

모든 해석에서 벽면 경계층 유동을 정밀하게 재현하기 위해, 선체 및 프로펠러 표면에 프리즘 층(prism layer) 격자를 적용하였다. 선체 표면에는 총 7~8개의 층을 구성하였으며, 연신율은 1.3 이하로 설정하였다. 프리즘 층의 총 두께는 선체 표면 경계층 두께의 약 20%~30% 수준이 되도록 설정하여, 경계층 내 유동 특성이 수치 모사될 수 있도록 하였다. 반면, 회전 유동이 집중되는 프로펠러 표면에는 총 14개의 층과 연신율 1.1을 적용하여 더욱 조밀한 격자 분포를 형성하였다. 프리즘 층의 첫 번째 셀 높이는 무차원 벽면 거리( $y^+$ ) 기준으로 설정되었다.  $y^+$  값은 벽 근처 유동의 해상도와 벽 함수 기법의 적용 범위를 결정짓는 주요 지표로 작용한다. 본 연구에서는 선체 표면에서의 평균  $y^+$ 를 약 30~80 범위로 유지하였으며, 프로펠러 표면에서는 1 이하를 만족하도록 하여 벽면 근처 유동을 보다 정밀하게 해석할 수 있도록 구성하였다. 벽함수는 STAR-CCM+에서 제공하는 All- $y^+$  Wall

Treatment 기법을 통해 수행되었다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 저항 해석에 대한 불확실도 분석

격자 구성은 수치 해석에서 사용자가 직접 제어할 수 있는 대표적인 불확실성 요인 중 하나로, 해석 대상의 형상 특성이나 유동장의 복잡성에 따라 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 특성으로 인해, CFD 기반 저항 해석에서는 격자 수 변화에 따른 해석 결과의 수렴 경향을 사전에 검토하는 과정이 필요하다. 만약 동일한 조건에서 격자 수에 따른 해석 결과가 불규칙하게 변하거나 수렴성이 나타나지 않는다면, 이는 현재의 격자 체계가 저항 성능에 영향을 미치는 주요 유동 특성을 적절히 반영하지 못하고 있음을 의미한다. 반면, 격자가 조밀해질수록 해석 결과가 일정한 범위 내에서 수렴하는 경향을 보인다면, 해당 격자 체계는 주요 유동 특성을 적절히 반영하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 선속 및 선종 조건에서 수행된 저항 해석 결과에 대해, 격자 조밀도 변화에 따라 일관된 수렴 경향이 나타나는지를 우선적으로 확인하였다. 이에 따라 격자 수준에 따른 해석 결과의 경향을 분석함으로써, 현재 사용하는 격자 체계가 격자 불확실도 분석에 적합한 체계인지를 평가하고자 하였다. 격자 수에 따른 해석 결과의 수렴 특성을 정량적으로 분석하기 위해, 각 선종별 저항 해석은 성긴 격자, 중간 격자, 조밀한 격자의 세 단계 격자 수준으로 구분하여 수행하였다. 성긴 격자(coarse), 중간 격자(medium), 조밀한 격자(fine)는 모두 동일한 격자 생성 설정을 기반으로 하되, base size를 변경함으로써 격자수를 조정하였다. target size와 minimum size 등 기타 세부 파라미터는 base size에 대해 상대값(relative value)으로 설정되어 있으므로, base size 변경 시 자동으로 조정되도록 설정하였다. 이를 통해 전체 격자 수가 평균적으로 약 1:2.25:5.06의 비율을 갖도록 하였으며, 성긴 격자는 약 59만~83만 개, 중간 격자는 약 133만~191만 개, 조밀한 격자는 약 300만~436만 개 수준으로 구성하였다.

이러한 격자 수 배분은 격자 수준 간 격자 수가 약 2배 내외로 증가하도록 구성되었으며, 이를 통해 격자 조밀도에 따른 해석 결과의 민감도 및 수렴 경향을 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다. 또한 모든 선형에 대해 유사한 격자 증가 비율을 유지함으로써 격자 수의 변화에 따른 해석 결과의 경향성을 체계적으로 평가할 수 있도록 하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 앞서 언급한 수렴 경향 및 격자 체계의 신뢰성 평가를 위한 저항 해석 결과를 대표 지표인 유효 마력(EHP)을 기준으로 정리한 것이다. 두 그림 모두 y축은 CFD 해석에서 계산된 유효 마력을 모형시험 결과로 나눈 비로 표현되며, 값이 1에 가까울수록 본 연구의 CFD 해석 결과가 모형시험 결과와 잘 일치함을 의미한다.

본 연구에서 제시된 유효마력은 모형 스케일에서 수행된 CFD 해석 결과를 바탕으로, ITTC에서 제안된 2차원 해석법을 적용하

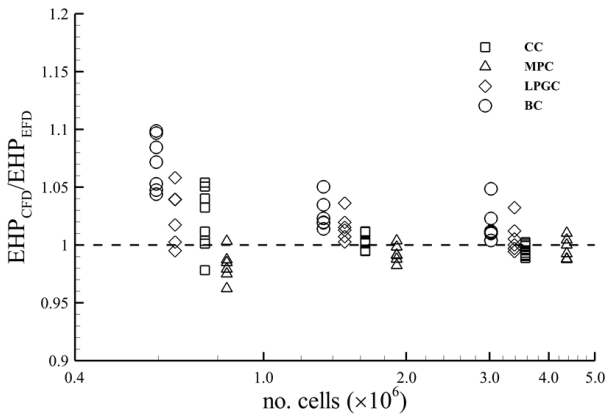


Fig. 3 Estimated effective power ratio vs. grid cell count

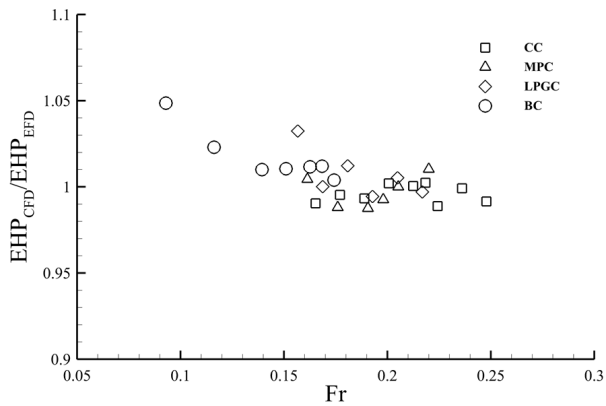


Fig. 4 Estimated effective power ratio vs. Froude number

여 산출하였다. 본 해석법은 마찰저항 계수를 기반으로 모형시험과의 유사성을 유지하면서 실선 저항을 추정하는 절차로, 국내외에서 널리 사용되는 공식적인 방법이다. 이 과정에서 필요한 상관 계수( $C_A$ ) 및 관련 보정 항목들은 모두 모형시험 보고서에서 제공된 값을 사용하였으며, 추가적인 경험적 보정이나 선종별 차별화는 적용하지 않았다. 따라서 본 연구에서 제시된 유효마력 비교 결과는 CFD 해석과 모형시험 결과를 동일한 기준에서 평가할 수 있도록 구성되었다.

먼저 Fig. 3은 모든 선형에 대해 성긴 격자, 중간 격자, 조밀한 격자 조건에서 계산된 결과를 정리한 것으로, x축에는 해석에 사용된 격자 수가 표시되어 있다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 격자 수가 약 100만 개 이하인 성긴 격자에서는 해석 결과의 분산이 비교적 크게 나타나며, 실험값보다 과소 혹은 과대 예측되는 사례가 모두 관찰된다. 반면, 약 150만 개 이상의 중간 격자부터는 예측값들이 1.0을 중심으로 좁은 범위에 분포하며, 성긴 격자 대비 분산이 줄어드는 경향을 보인다. 특히 약 300만 개 이상에 해당하는 조밀한 격자에서는 선형에 관계없이 결과가 비교적 일정한 범위 내에 분포하는 경향을 보인다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 사용된 해석 결과 중 조밀한 격자 조건에 해당하는 데이터만을 추출하여, x축을 프루드 수(Fr)로 변환해 정리한 것이다. 이는 속도 조건 변화에 따른 해석 정확도 및 일관성의 변화를 확인하기 위함이다. Fig. 4를 통해 확인할 수 있듯이,

Fr이 0.15 이상인 조건에서 y축 값이 0.97~1.03 범위 내에 분포하고 있으며, 이는 해석 결과가 속도 조건에 관계없이 일정 수준의 일관성을 보임을 의미한다. 다만, Fr이 0.13 이하인 조건에서는 예측값이 상대적으로 과대 평가되는 경향도 관찰되었다.

이전 수렴 경향 분석을 바탕으로, 본 연구에서는 각 선형 및 선속 조건에서 해석 결과의 수렴 특성을 정량적으로 평가하고, 격자 불확실도를 산정하기 위해 GCI 기반의 분석을 수행하였다. GCI 계산에는 Xing and Stern (2010)이 제안한 Richardson 외삽법 기반의 보정 인자(Correction Factor,  $C_G$ )를 적용하였으며,  $C_G$ 의 값에 따라 정의된 아래 조건식을 이용하여 본 연구에서 사용한 격자 불확실도( $U_G$ )와 보정된 추정치의 불확실도( $U_{GC}$ )를 산정하였다.

$$U_G = FS \left| \delta_{REG}^* \right| \tag{1}$$

$$FS = \begin{cases} 9.6(1 - C_G)^2 + 1.1 & 0.875 < C_G < 1.125 \\ 2 |1 - C_G| + 1 & 0 < C_G \leq 0.875 \text{ or } C_G \geq 1.125 \end{cases} \tag{2}$$

$$U_{GC} = FS \left| \delta_{REG}^* \right| \tag{3}$$

$$FS = \begin{cases} 2.4(1 - C_G)^2 + 0.1 & 0.75 < C_G < 1.25 \\ |1 - C_G| & 0 < C_G \leq 0.875 \text{ or } C_G \geq 1.125 \end{cases} \tag{4}$$

여기서 FS는 수치 해석 결과에 내재된 격자 불확실도를 보수적으로 추정하기 위한 안전 계수(factor of safety)이다.  $\delta_{REG}^*$ 는 해당 물리량의 보정된 추정치와 현재 격자에서 얻어진 물리량의 차이를 나타낸다.

각 선형 및 선속 조건에 대한 불확실도 분석 결과는 Table 6~9에 정리되어 있다. 총 28개의 해석 조건 중 5건은 GCI 기반의 격자 불확실도 분석에서 제외하였으며, 이는 해당 조건들이 수렴 차수 계산의 기반이 되는 수렴비(ratio)에 대해 다음 두 가지 중 하나에 해당하기 때문이다. 여기서 수렴비는 해석 결과로 얻

Table 6 Verification of grid systems for resistance calculation of container carrier

Fr	ratio	p	$U_G$ (%)	$U_{GC}$ (%)
0.1653	0.240	5.500	2.55	1.12
0.1771	0.115	8.341	1.70	0.81
0.1889	0.190	6.388	2.49	1.14
0.2007	0.230	5.666	2.56	1.14
0.2125	0.416	3.378	0.73	0.25
0.2184	0.425	3.299	1.96	0.65
0.2243	0.669	1.549	1.87	0.33
0.2361	-2.140	-	-	-
0.2479	-0.426	-	-	-

Table 7 Verification of grid systems for resistance calculation of PC tanker

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.1613	1.927	-	-	-
0.1760	0.505	2.482	0.04	0.01
0.1906	0.258	4.915	1.24	0.53
0.1980	0.128	7.468	0.39	0.19
0.2053	0.516	2.400	1.41	0.25
0.2200	0.897	0.394	27.90	8.76

Table 8 Verification of grid systems for resistance calculation of LPG carrier

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.1567	0.173	6.381	0.93	0.43
0.1687	0.475	2.707	2.32	0.58
0.1808	0.378	3.537	1.55	0.55
0.1928	0.561	2.101	1.21	0.12
0.2049	-0.787	-	-	-
0.2169	-0.838	-	-	-

Table 9 Verification of grid systems for resistance calculation of bulk carrier

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.0929	0.706	1.283	0.74	0.17
0.1162	0.319	4.215	2.66	1.06
0.1394	0.335	4.034	2.12	0.83
0.1510	0.378	3.590	1.97	0.71
0.1626	0.117	7.930	1.99	0.95
0.1684	0.146	7.094	2.85	1.33
0.1742	0.121	7.790	2.64	1.25

어진 유효 마력(EHP)을 기준으로, 중간 격자와 조밀한 격자 간의 차이를 성긴 격자와 중간 격자 간의 차이로 나눈 값이다. 첫째, 수렴비가 음수인 경우는 세 격자 조건에서 해석 결과의 변화 방향이 일관되지 않아, 중간 격자 결과가 조밀 격자 또는 성긴 격자 중 한쪽과 반대 방향으로 편차를 보이는 경우에 해당한다. 둘째, 수렴비의 절대값이 1보다 큰 경우는 격자 조밀도가 증가함에도 불구하고 물리량이 점진적으로 수렴되지 않는 경우에 해당한다. 따라서 수렴비가 음수이거나 수렴비의 절대값이 1보다 큰 경우는, 해석 결과가 격자 조밀도 증가에 따라 점진적으로 수렴하지 않고, 변화 양상이 비단조적으로 나타나는 상황을 의미한다. 이러한 조건에서는 수렴 차수(p) 계산이 수학적으로 성립되지 않으며, 해석 결과의 신뢰성이 확보되지 않기 때문에 GCI 분석에서 제외하였다. 불확실도 분석에서 제외된 조건을 선형별로 분류하면, CC의 Fr = 0.2361 및 0.2479, MPC의 Fr = 0.1613, LPGC의 Fr = 0.2049 및 0.2169 조건에서 수렴비가 음수이거나 수렴

비의 절대값이 1보다 크게 나타났다.

이를 제외한 나머지 23건의 조건에 대해서는 수렴 차수(p), U<sub>G</sub>와 U<sub>GC</sub>를 산정하였다. 대부분의 조건에서 U<sub>G</sub>는 3% 이하의 값을 보였으며, 전반적으로 일정한 수렴 경향이 확보되었다. 예외적으로 MPC의 Fr=0.2200 조건에서 U<sub>G</sub>가 27.90%로 비정상적으로 크게 나타났다. 이 조건에서는 성긴 격자와 중간 격자 간, 그리고 중간 격자와 조밀한 격자 간의 해석 결과 차이가 유사하게 나타났으며, 이로 인해 수렴 차수가 0.39로 비정상적으로 작게 산정되었고, U<sub>G</sub>가 과도하게 증가하였다.

해당 조건을 제외한 22건의 조건에서 U<sub>G</sub>는 0.04%에서 2.85% 사이의 범위에 분포하였으며, 수치적 민감도가 안정적으로 유지되었다. U<sub>GC</sub>는 0.01%에서 1.33% 사이의 값을 보였으며, 모든 조건에서 2%를 초과하지 않았다.

본 연구의 결과를 바탕으로 판단할 때, 약 300만 개에서 400만 개 수준의 격자를 적용할 경우, CFD 기반 저항 해석에서 예측된 유효 마력은 모형시험 결과 대비 ±3% 이내의 오차 범위에서 수렴할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 해당 격자 수준에서는 GCI 기반으로 산정된 격자 불확실도 지수(U<sub>G</sub>) 역시 대부분의 조건에서 3% 이하로 유지되어, 수치적 수렴성과 예측 신뢰도가 모두 확보되는 것으로 평가된다.

### 3.2 저항 해석에 대한 불확실도 분석

저항 해석은 목표 선속 조건에서 선박이 자력으로 등속 항주할 때, 추진력과 저항이 균형을 이루는 지점을 수치적으로 추정하는 과정이다. 본 연구에서는 서로 다른 프로펠러 회전수를 적용한 두 조건에 대해 저항 해석을 수행하였으며, 각 해석에서는 주어진 회전수를 고정된 상태로 계산을 진행하였다. 또한, 저항 해석 결과에서 도출된 trim과 sinkage를 반영한 고정 자세 조건 하에 계산을 수행하였다. 두 해석 결과를 바탕으로 선형 보간을 통해 저항점을 추정하였다.

저항 해석은 해석 격자의 밀도에 따라 총 세 단계로 구분된 격자 체계를 구성하여 수행하였다. 성긴 격자(coarse)는 약 190만(선체 영역: 126만, 프로펠러 영역: 64만)~251만(선체 영역: 166만, 프로펠러 영역: 85만) 개, 중간 격자(medium)는 약 441만(선체 영역: 286만, 프로펠러 영역: 155만)~556만(선체 영역: 369만, 프로펠러 영역: 187만) 개, 조밀한 격자(fine)는 약 1015만(선체 영역: 663만, 프로펠러 영역: 352만)~1230만(선체 영역: 866만, 프로펠러 영역: 364만) 개 수준으로 구성되었으며, 전체 격자 수는 각 단계에서 약 2.17배씩 증가하도록 구성하였다. 이는 저항 해석에서 사용된 격자 비율과의 일관성을 고려하여 유사한 비율로 설정하였다.

저항 성능의 정확도는 유효마력 뿐만 아니라 프로펠러 효율에도 크게 의존한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 프로펠러 성능 계수의 예측 정확도를 검토하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 격자 수에 따른 추력 계수(K<sub>T</sub>)와 토크 계수(K<sub>Q</sub>)의 CFD 결과와 모형시험값의 비율을 나타낸 것이다. 전반적으로 격자 수준에 따른 뚜렷한 단

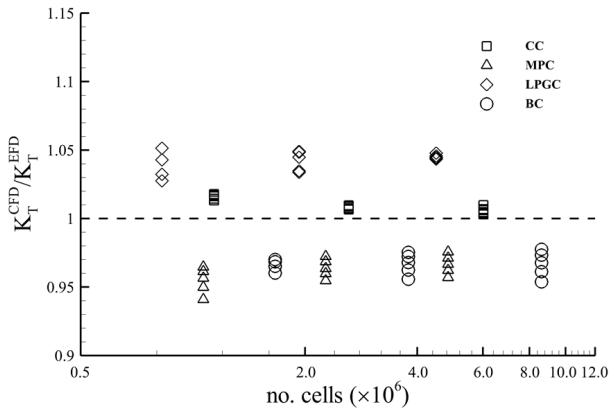


Fig. 5 Predicted thrust coefficient ratio vs. grid cell count

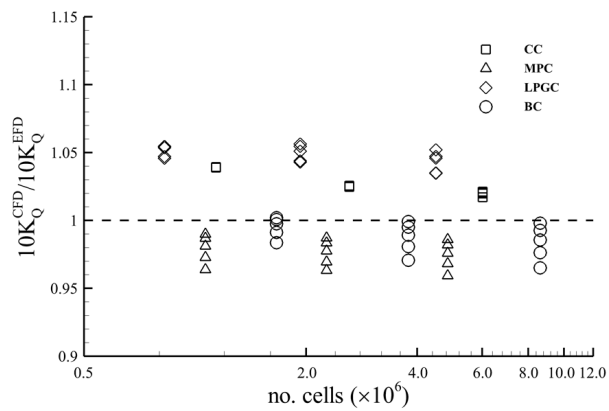


Fig. 6 Predicted torque coefficient ratio vs. grid cell count

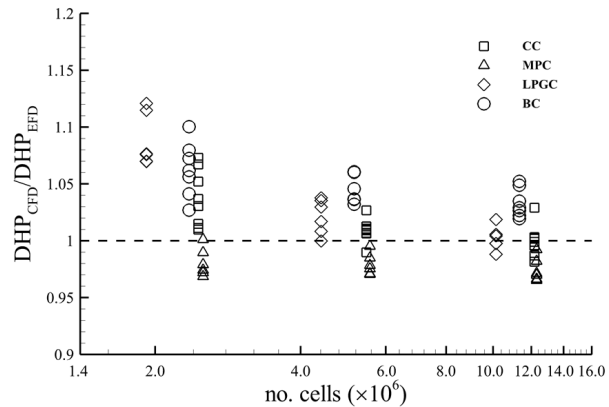


Fig. 7 Estimated delivered power ratio vs. grid cell count

조 수렴은 관찰되지 않으며, 프로펠러 종류별로 상하향 편향이 일관되게 나타난다. 예를 들어 LPGC 프로펠러의 경우  $K_T$ 와  $10K_Q$ 가 대체로 1.03~1.05 수준으로 과대 예측되는 반면, MPC 프로펠러는  $K_T$ 가 약 0.94~0.97,  $10K_Q$ 가 0.97~0.99로 다소 과소 예측 되는 경향이 지속된다. CC 프로펠러는 1.00~1.02 부근에서, BC 프로펠러는 0.96~0.99 부근에서 비교적 좁은 범위로 분포하였다. 또한, 조밀한 격자 조건에서는 전체적으로 산포가 다소 축소되어, 대부분의 조건이  $\pm 5\%$  이내에 위치하였다. 즉, 격자 수 증가가 산포를 다소 완하시키는 효과는 있으나, 주된 차이는 프

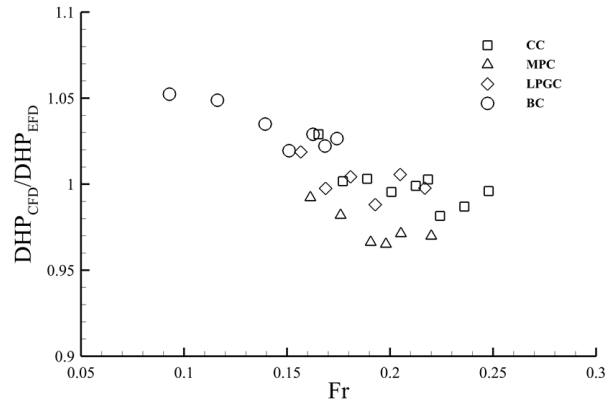


Fig. 8 Estimated delivered power ratio vs. Froude number

로펠러별 특성에 기인한다. 따라서 프로펠러 성능 계수의 예측은 절대적인 일치보다는 일정한 편향과 제한된 오차 범위 내에서 안정된 경향성을 보인다고 할 수 있다.

이러한 기반 위에서 자항 해석의 수치적 신뢰성을 정량적으로 평가하기 위해, 각 조건에서 계산된 전달 마력(DHP)을 모형시험 결과와 비교하였다. Fig. 7와 Fig. 8은 이 비교 결과를 격자 수 및 Fr에 따라 정리한 것으로, y축은 CFD 기반 자항 해석에서 산출된 DHP를 모형시험 결과로 나눈 비를 나타낸다. 값이 1에 가까울수록 CFD 해석 결과가 실험값과 잘 일치함을 의미한다. Fig. 7는 격자 수에 따른 해석 결과의 변화 경향을 나타낸 것으로, 성긴 격자에서는 예측값의 분산이 큰 편이며, 일부 선형에서는 실제 대비 10% 이상의 과대 추정이 관찰되었다. 반면, 중간 격자 및 조밀한 격자에서는 결과가 1.0을 중심으로 더 좁은 범위에 분포하며, 격자 수 증가에 따라 해석 결과의 수렴성과 일관성이 개선되는 경향을 보였다. Fig. 8은 fine 격자 조건에서 수행된 자항 해석 결과만을 추출하여, x축을 프루드 수(Fr)로 정리한 것이다. 이를 통해 속도 조건 변화에 따른 DHP 예측 정확도의 경향을 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 선종 간에는 오차의 절대적인 수준에 차이가 있으나, 동일 선종 내에서는 속도가 변하더라도 DHP 예측 오차가 비교적 좁은 범위 내에서 유지되는 일관된 경향을 보인다.

예를 들어, CC는  $Fr=0.17\sim 0.26$  구간에서 DHP 비가 0.98~1.03 범위에 분포하며, 전반적으로 실험치와의 차이가 작으며, 예측 결과는 일정한 수준에서 안정적으로 유지된다. MPC의 경우에는 DHP 비가 0.96~0.99 수준으로 다소 낮게 형성되지만, 해석 조건에 따라 소폭의 편차만 존재할 뿐 전체적으로 안정된 예측 양상을 유지한다. LPGC는 0.98~1.02 범위에 걸쳐 분포하며, 특히 중간 속도 조건에서 오차가 작게 유지된다. BC는 비교적 낮은 Fr 조건에서 해석이 수행되었으며, DHP 비는 1.02~1.05 수준으로 일정하게 분포한다. 전반적으로 절대 오차는 다소 존재하지만, 해석 결과가 좁은 범위 내에서 안정적으로 수렴하고 있다는 점에서 일관된 예측 경향을 확인할 수 있다.

동일 선종 내에서 속도 조건에 관계없이 예측 오차가 일정한 범위에 머무는 경향은, 해석의 내부 일관성이 확보되고 있음을 보여준다. 본 연구에서는 이러한 경향을 정량적으로 분석하고,

Table 10 Verification of grid systems for self-propulsion calculation of container carrier

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.1653	0.254	5.129	2.97	1.28
0.1771	0.164	6.765	2.43	1.12
0.1889	0.360	3.825	2.93	1.10
0.2007	0.580	2.037	2.33	0.21
0.2125	1.535	-	-	-
0.2184	0.556	2.199	1.56	0.18
0.2243	0.174	6.553	2.19	1.01
0.2361	1.146	-	-	-
0.2479	-5.913	-	-	-

Table 11 Verification of grid systems for self-propulsion calculation of PC tanker

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.1613	0.500	2.616	0.56	0.13
0.1760	0.604	1.905	0.51	0.05
0.1906	1.541	-	-	-
0.1980	0.610	1.867	1.00	0.10
0.2053	-0.719	-	-	-
0.2200	-1.633	-	-	-

Table 12 Verification of grid systems for self-propulsion calculation of LPG carrier

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.1567	0.119	7.674	2.72	1.29
0.1687	0.100	8.294	2.76	1.32
0.1808	0.212	5.592	3.04	1.35
0.1928	0.168	6.417	2.96	1.36
0.2049	0.860	0.545	46.37	14.13
0.2169	1.052	-	-	-

격자 수에 따른 예측 신뢰도를 평가하기 위해 GCI 기반의 수렴성 분석을 수행하였다. 자항 해석에 대해 수행된 총 28개의 해석 조건 중 9건은 GCI 기반 격자 수렴성 분석에서 제외되었다. 수렴비는 DHP의 격자 수준 간 변화 양상을 정량화하기 위한 지표로, 수렴 차수 계산의 기반이 된다. 수렴비가 기준을 만족하지 않아 GCI 분석에서 제외된 조건은 다음과 같다. CC의 Fr = 0.2125, 0.2361 및 0.2479, MPC의 Fr = 0.1906, 0.2053 및 0.2200, LPGC의 Fr = 0.2169, BC의 Fr = 0.1510 및 0.1626이다.

이를 제외한 나머지 19건의 해석 조건에 대해서는 수렴 차수와 격자 불확실도 지수(U<sub>G</sub>, U<sub>GC</sub>)를 산정하였다. 계산 결과는 Table 10부터 Table 13에 정리되어 있으며, 각 선형별 자항 해석 사례를 포함하고 있다. 대부분의 조건에서 수렴 차수는 1.5 이상을 나타냈고, U<sub>G</sub>는 0.51%에서 3.04% 범위로 안정적으로 유지되

Table 13 Verification of grid systems for self-propulsion calculation of bulk carrier

Fr	ratio	p	U <sub>G</sub> (%)	U <sub>GC</sub> (%)
0.0929	0.442	3.111	1.68	0.52
0.1162	0.281	4.840	2.71	1.14
0.1394	0.407	3.427	2.32	0.80
0.1510	-1.770	-	-	-
0.1626	1.743	-	-	-
0.1684	0.409	3.410	2.14	0.73
0.1742	0.354	3.958	2.12	0.81

었다. 또한, U<sub>GC</sub> 역시 0.05%에서 1.36% 사이에 분포하며, 모든 조건에서 3%를 넘지 않는 양호한 결과를 보였다. 이는 격자 수가 일정 수준 이상 확보될 경우, 자항 해석에서도 충분한 수치 수렴성과 예측 신뢰도를 기대할 수 있음을 의미한다. 다만, 일부 조건에서는 격자 수준 간 해석 결과가 일관되지 않게 변화하면서 수렴 차수가 일시적으로 낮게 산정되는 사례도 있었다. 예를 들어, LPGC의 Fr=0.2049 조건에서는 중간 격자 해석 결과가 다른 격자와 상반된 방향으로 편차를 보여, 수렴 차수와 U<sub>G</sub>가 과대 산정되었다. 그러나 이들은 전체 28건 중 일부(1건)에 해당하는 사례이며, 전체 해석 경향 및 신뢰도 평가의 타당성에는 큰 영향을 미치지 않는다.

본 연구 결과를 종합하면, 약 1,000만 개 이상의 격자를 적용한 조밀한 격자 조건에서 수행된 자항 해석의 경우, GCI 산정이 가능한 조건 하에서 격자 불확실도 지수 3% 이하를 만족하며, 수치적 신뢰도 측면에서 안정적인 결과를 보였다. 이를 통해, 자항 해석에서도 적절한 격자 밀도를 확보할 경우 격자 수렴성을 기반으로 한 예측 신뢰도 확보가 가능함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 향후 유사한 해석 조건에서의 격자 구성 및 수치 불확실도 평가에 실질적인 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 다양한 선종과 운항 조건을 대상으로 CFD 기반 저항 해석 및 자항 해석을 수행하고, 격자 조밀도 변화가 해석 정확도와 수치 수렴 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 총 56건(저항 28건, 자항 28건)의 해석 조건에 대해 수렴 차수와 격자 불확실도 지수를 산정한 결과, 대부분의 조건에서 수렴 차수는 1.5 이상, U<sub>G</sub>는 3% 이하의 범위에 분포하였다. 격자 수가 일정 수준 이상 확보된 조건에서는 예측 결과가 전반적으로 안정적인 수렴 특성을 나타냈다.

특히, 조밀한 격자 조건(약 1,000만 개 이상)을 적용한 경우, 동일 선형 내에서도 속도 조건에 관계없이 해석 결과가 좁은 범위에 모여 분포하였고, 수치적으로도 일관된 경향을 보였다. 일부 조건에서는 격자 수준 간 결과 차이로 인해 GCI 분석에서 제외되거나 U<sub>G</sub>가 상승하는 사례도 있었지만, 이는 전체 조건 중 일

부에 해당하며 해석 경향이나 신뢰성에는 유의미한 영향을 주지 않는 수준이었다.

저항 해석 분야는 그동안 저항 해석에 비해 명확한 수치 해석 기준이나 격자 구성 지침이 부족하다는 한계를 안고 있었다. 본 연구는 다양한 선형과 속도 조건을 아우르는 해석과 격자 수렴성 기반의 정량 분석을 통해, 실제 해석에 적용 가능한 격자 구성 기준과 신뢰도 확보 조건을 도출하였다. 특히 저항 해석에서도 격자 수가 일정 수준 이상 확보되어 GCI 분석이 가능한 경우, 예측 결과의 수치적 안정성과 일관성을 확보할 수 있음을 확인하였으며, 이러한 결과는 향후 유사 조건에서 수행되는 CFD 기반 수치 해석의 신뢰도 확보 및 해석 기준 설정에 있어 실용적인 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 '친환경 중소형 선박 기술역량 강화사업[P0020268]' 과제 및 조선해양산업기술개발사업 "고속선 및 소형선박의 성능검증 시스템 개발[20026528]" 과제의 일부로 수행되었음을 밝혀둡니다.

## References

Carrica, P.M., Fu, H. and Stern, F., 2011. Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model. *Applied Ocean Research*, 33(4), pp.309–320.

Eça, L. and Hoekstra, M., 2014. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. *Journal of Computational Physics*, 262, pp.104–130.

Hino, T., Stern, F., Larsson, L., Visonneau, M., Hirata, N. and Kim, J., eds., 2020. *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop*. Springer: Cham.

Hoa, N.T.N., 2024. Numerical prediction of ship's self-propulsion parameter by using CFD method. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 18(2), pp.427–432.

International Towing Tank Conference (ITTC), 2011. *Practical guidelines for ship CFD applications*. Recommended Procedures and Guidelines, 7.5–03–02–03.

Jin, Y., Duffy, J., Chai, S. and Magee, A.R., 2019. DTMB 5415M dynamic manoeuvres with URANS computation using body-force and discretised propeller models. *Ocean Engineering*, 182, pp.305–317.

Kim, J., Park, I.Y., Kim, K.S. and Van, S.H., 2005. RANS Simulations for KRISO Container Ship and VLCC Tanker. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp.593–600.

Roache, P.J., 1998. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers: Albuquerque.

Roy, C.J., 2005. Review of code and solution verification procedures for computational simulation. *Journal of Computational Physics*, 205(1), pp.131–156.

Song, K., Guo, C., Sun, C., Wang, C., Gong, J., Li, P. and Wang, L., 2021. Simulation strategy of the full-scale ship resistance and propulsion performance. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), pp.1321–1342.

Xing, T. and Stern, F., 2010. Factors of safety for Richardson extrapolation. *Journal of Fluids Engineering*, 132(6), 061403.

