

실선 스케일 CFD 해석 기반 트림 탭이 부착된 고속선의 유체동역학적 성능 분석

이종현* · 박동우**†

* 동명대학교 조선해양시뮬레이션센터 연구원, ** 동명대학교 조선해양공학부 교수

A Study on the Hydrodynamic Performance of High-Speed Vessel with Trim Tab Using Full-Scale CFD Simulation

Jonghyeon Lee* · Dong-Woo Park**†

* Researcher, Shipbuilding & Marine Simulation Center, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

** Professor, School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

요 약 : 본 연구에서는 Froude 수 1.0, 길이 약 10 m 급 소형 고속선의 저항성능과 승선감을 향상시키기 위해 선미 끝단에 트림 탭을 부착하여 항주자세를 제어하였고, 트림 탭의 제원에 따른 성능을 확인하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 먼저 선형 연구로부터 수치 해석이 수행되는 스케일에 따라 결과에 차이가 있는 것이 확인되었고, 이를 피하고자 실선 스케일에서의 해석을 수행하였다. 부착된 트림 탭의 코드 길이는 L_{pp} 의 0.5, 1.0, 1.5%였으며, 선저 면과의 각도는 5° 간격으로 변화를 주었다. 트림 탭은 선박의 선미트림과 부상량을 감소시키는 효과가 있었으며, 이 효과는 트림 탭의 선저 면과의 각도가 클수록, 코드 길이가 길수록 증가하였다. 이로 인해 압력 저항은 감소하고 전단저항은 증가하였으며, 두 성분의 변화량에 따라 전 저항 저감율이 결정되었다. 결과로부터 대상 선박의 최적 항주자세는 약 1.5°의 선미트림으로 특정되었고, 이때 저항성능은 약 27% 개선되었다.

핵심용어 : 소형 고속선, 트림 탭, 항주자세, 저항성능, 실선 수치해석, 전산유체역학

Abstract : In this study, trim tabs were attached to end of stern hull of a small high-speed vessel of length approximately 10 m and Froude number 1.0 to improve resistance performance and passenger comfort. Before computational fluid dynamics (CFD) simulations to assess the performance according to various geometries of the trim tab, the scale effect had been found through a previous study, so full-scale simulations were performed. The trim tab chord length was set to 0.5%, 1.0% and 1.5% of L_{PP} , and its angle to base line was varied in intervals of 5°. It decreased trim by stern and flotation: the greater the angle and length, the greater was the effect. Then it had pressure resistance decreased and shear resistance increased, and reduction ratio of total resistance varied accordingly. The results of this study indicated that the resistance performance was improved about 27% at optimal running attitude that was the trim by stern about 1.5°.

Key Words : Small high-speed vessel, Trim tab, Running attitude, Resistance performance, Full-scale simulation, CFD

1. 서 론

설계 단계에서 선박의 성능(performance)을 미리 예측하는 것은 선박의 효율(efficiency)과 안전성(safety) 등을 판단할 수 있는 지표가 되기에 필수적이다. 이를 토대로 EEDI(Energy Efficiency Design Index), DFOC(Daily Fuel Oil Consumption) 등

이 계산되고, IMO(International Maritime Organization), ISO(International Organization for Standardization) 등 여러 국내외 기구가 규정하는 선박에 대한 각종 규제(rule)의 만족 여부를 판단하여 설계 방향을 수정하기도 한다.

선박의 성능에는 저항(resistance), 추진(propulsion), 운동(motion), 조종성능(manoeuvring) 등이 있고, 저항·추진성능은 선박의 속도 및 연료 효율 등과, 운동·조종성능은 안정성(stability) 등과 연관된다. 이들의 예측에는 주로 실선에 일정한 축척비(scale ratio)를 적용하여 축소시킨 모형선에 대

* First Author : slj3142@daum.net, 051-629-3662

† Corresponding Author : dwpark@tu.ac.kr, 051-629-1654

한 예인 수조(towing tank)에서의 모형시험(model test) 또는 CFD(Computational Fluid Dynamics), 포텐셜유동(potential flow) 해석 등의 방법이 사용된다. 정확도가 가장 높은 예측 방법은 실선 스케일(full-scale)에서의 실험 및 해석이지만, 실험이 수행되는 예인 수조의 규모를 고려하면 실선에 대한 모형시험은 어려움이 따른다. 수치해석의 경우에도 모형 스케일(model-scale)에서의 해석에 비해 많은 자원과 시간이 필요하지만, 최근에는 하드웨어와 소프트웨어 그리고 수치해석 기법의 발달로 실선 스케일에서의 CFD 해석에 기반한 많은 연구가 수행되고 있다.

선박의 성능 중 저항성능은 설계 단계에서 선형(hull form)을 결정하는 중요한 지표 중 하나이고, 모형시험 또는 수치해석을 통해 실선의 전 저항(total resistance)과 유효동력(effective power)을 예측함으로써 알 수 있다. 이는 선체(hull)와 프로펠러의 상호 작용에 의한 추진성능과도 직결되는데, 자항(self-propulsion)시험의 기반이 되어 전달동력(delivered power)과 제동동력(brake power)이 예측되고, 이로부터 선박의 선속(ship speed), 프로펠러의 회전수, EEDI, DFOC 등이 추정되므로 정확한 예측이 필요하다.

모형 스케일에서의 실험과 해석을 수행하여 얻어진 모형선의 전 저항으로부터 실선의 저항성능을 예측하기 위해 실선 확장(extrapolation) 방법이 사용된다. 대표적인 방법으로는 ITTC(International Towing Tank Conference)에서 제안한 ITTC 1957(Harvald, 1983), ITTC 1978(ITTC, 1999) 방법 등이 있고, 이때 정확한 측정이 어려운 계수(coefficient)는 경험식을 통해 근사된다. 마찰저항(frictional resistance) 계수는 난류 경계층(turbulent boundary layer)에 대한 2차원 해석으로부터 정의된 Schoenherr의 평판 마찰저항 법칙에 3차원 효과를 추가한 ITTC 1957 공식(Todd, 1957)으로부터 계산된다. 또한 모형선-실선 상관 계수(model-ship correlation allowance)는 배수량에 대한 경험식(Harvald, 1983), 선체의 표면 거칠기(roughness)에 대한 경험식(ITTC, 1999) 등으로부터 계산되는데, 이 과정에서 예측된 실선의 저항성능과 실제 선박의 성능 사이에 차이가 발생할 수 있다. 이외에도 역학적 유사(dynamic similarity) 중 Reynolds 상사가 현실적으로 불가능한 이유로 Froude 상사 법칙만 만족시킨 채 실험과 해석이 수행되기 때문에 모형선 주위 유체와 실제 선박 주위 유체의 성질이 달라 스케일에 의한 영향(scale effect)이 존재한다.

최근 저항성능을 예측함에 있어 스케일 차이에 의해 발생하는 영향은 많은 관심을 받고 있으며, 실선 스케일에서의 CFD 해석과 관련된 다양한 연구가 활발히 수행되고 있다. Hochkirch and Mallol(2013)은 저항성능 관점에서의 최적 중경사(trim)를 찾기 위해 중경사를 변화시켜 가며, Farkas et

al.(2018)은 하중 조건(load condition)에 따른 저항성능을 예측하기 위해 여러 흘수(draft)에서, Niklas and Pruszek(2019)는 선수(bow) 형상의 변화로 인한 저항성능 개선 효과를 보기 위해 모형시험과 모형 및 실선 스케일에서의 CFD 해석을 수행하고 각 결과를 비교했다. 그 결과 공통적으로 스케일에 따른 차이가 있었으며, 그로부터 실선 주위 유동의 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해 실선 스케일에서의 해석이 필요함을 보이고 있다.

본 연구에서는 Froude 수 1.0으로 운항하는 약 10 m 급 길이의 소형 고속선을 대상으로 항주자세(running attitude) 제어를 통해 저항성능을 개선시키고자 선미(stern) 끝단에 트림 탭(trim tab)을 부착했고, 트림 탭의 제원(particular)과 선저면(base line)과의 각도에 따른 항주자세의 변화와 저항성능을 예측했다. 본 연구에 앞서 선행 연구로 단일 제원의 트림 탭이 부착된 대상 선박에 대해 모형 및 실선 스케일에서의 CFD 해석을 수행했고, 스케일에 따라 동일한 트림 탭 각도에서 제어되는 항주자세와 예측된 저항성능에 차이가 있음을 확인했다(Lee and Park, 2021). 이에 따라 보다 정확한 예측을 위해 여러 제원의 트림 탭이 부착된 대상 선박에 대해 실선 스케일에서 CFD 해석을 수행했고, 결과로부터 최고의 저항성능을 보이는 최적 항주자세를 특정했다.

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식

비압축성 유체(incompressible fluid)를 가정하면, 이때의 지배방정식(governing equation)은 연속방정식(continuity equation)과 운동량방정식(momentum equation)이다. 공학적 문제의 해결을 위해 연속방정식과 앙상블 평균화(ensemble averaging)된 운동량방정식인 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용했고, 이들은 직교 좌표(cartesian coordinates)에서 각각 식(1), 식(2)와 같이 텐서로 표기된다(Ferziger and Perić, 2002).

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \\ & + \rho \bar{g}_i \end{aligned} \quad (2)$$

식(1), 식(2)에서 ρ 는 유체 밀도, μ 는 유체 점성 계수(dynamic viscosity), \bar{p} 는 평균 압력, \bar{g}_i 는 중력가속도, \bar{u}_i 와 $\bar{u}_j(i, j = 1, 2, 3)$ 는 x_i 와 $x_j(i, j = 1, 2, 3)$ 방향으로의 평균 유속, $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds stress)이다.

2.2 난류 모델

선체 주위 난류 유동의 예측을 위해 선행 연구와 동일한 RKE 2L(Realizable k - ϵ Two-Layer) 난류 모델(turbulence model)을 사용했다. 모델 간의 비교와 본 연구에 사용된 모델의 채택 이유 그리고 RKE 2L 모델에 대한 설명은 선행 연구 논문(Lee and Park, 2021)에서 상세히 다루고 있다.

RKE 2L 모델의 방정식은 식(3), 식(4)와 같으며, 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy, k)와 그 소산율(dissipation rate, ϵ)로 구성된 2개의 수송방정식(transport equation)을 특징으로 갖는다(CD-adapco, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + f_c G_k + G_b + Y_M - \rho(\epsilon - \epsilon_0) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{T_e} C_{\epsilon 1} (f_c S k + C_{\epsilon 3} G_b) - \rho C_{\epsilon 2} \frac{k}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \left(\frac{\epsilon}{T_e} - \frac{\epsilon_0}{T_0} \right) \quad (4)$$

식(3), 식(4)에서 ν 는 유체 동점성 계수(kinematic viscosity), μ_t 는 난류 와동(turbulent eddy) 점성 계수, σ_k , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, $C_{\epsilon 3}$ 는 모델 계수(model coefficient), f_c 는 곡률 보정 계수(curvature correction factor)(Arolla and Durbin, 2013), G_k 와 G_b 는 평균 속도 구배(velocity gradient)와 부력(buoyancy)에 의한 난류 운동에너지, Y_M 은 압축성 보정(compressibility modification)(Sarkar and Balakrishnan, 1991), S 는 평균 변형률 속도(strain rate) 텐서의 모듈러스(modulus)이다. T 는 난류 시간 척도(turbulent time scale)이며, 아래 첨자 0, e 는 각각 Ambient turbulence(Spalart and Rumsey, 2007), Large-eddy를 뜻한다. 각 변수에 대한 설명은 STAR-CCM+ User Guide(CD-adapco, 2018)에서 상세히 다루고 있다.

2.3 자유 수면

선체 주위 자유 수면(free surface)의 모사를 위해 VOF (Volume of Fluid) 모델을 사용했다. VOF 모델은 혼합되지 않

는 유체가 공존하는 경우, 유체의 경계면 분포(distribution of interface)와 이동(movement)의 예측에 사용된다. 이들은 유체의 체적 분율(volume fraction)로부터 모사되며, 체적 분율은 식(5)와 같다(CD-adapco, 2018).

$$\alpha_m = \frac{V_m}{V} \quad (5)$$

식(5)에서 V_m 은 셀(cell)에 공존하는 유체 중 m 번째 유체 체적, V 는 셀 전체 체적이며, 셀에 있는 유체의 체적을 모두 합하면 1이다. 유체의 체적 분율은 어떤 유체가 셀에 전혀 없거나 오직 그 유체로만 채워져 있는 경우 각각 0과 1이며, 다른 유체도 공존하는 경우 0과 1 사이로 경계면을 나타낸다.

VOF 모델의 자유 수면 모사를 위한 수송방정식은 식(6)과 같다.

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_m \bar{u}_j) = 0 \quad (6)$$

3. 연구 대상

3.1 대상선

대상 선박은 설계 속도(design speed)가 18.0knots인 길이 약 10 m 급 수소추진선박이며, 예상 항로는 부산지역 연안으로 편도 소요 시간은 약 1시간이다.

대상 선박의 주요 제원(main particulars)이 Table 1에, 선도(lines)가 Fig. 1에 도시되어 있다.

Table 1. Main particulars of target ship

Designation	Symbol [unit]	
Froude number	Fn	0.985
Reynolds number	Rn ($e+7$)	7.01
Design speed	V_s	[knot] 18.0
		[m/s] 9.26
Length between perpendiculars	L_{pp} [m]	8.97
Length of waterline	L_{WL} [m]	9.00
Breadth	B [m]	3.70
Draft	T [m]	0.650
Wetted surface area	S [m^2]	29.0
Displacement volume	∇ [m^3]	9.70

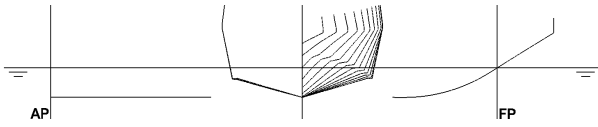


Fig. 1. Body plan and side view of target ship.

3.2 트림 탭

항주자세를 제어하여 저항성능과 승선감을 향상시키기 위해 Fig. 2와 같이 대상 선박의 선미 끝단을 따라 트림 탭을 부착했다. 코드 길이(chord length)는 선체의 L_{pp} 에 대해 0.5, 1.0, 1.5%의 비율로 변화를 줬고, 선저 면과의 각도를 포함한 주요 제원이 Table 2에 도시되어 있다.

Table 2. Main particulars of trim tab

Designation	Symbol [unit]				
Chord length	c [m]	0.045	0.090	0.135	
Span length	b [m]	1.57			
Thickness	t [m]	0.010			
Angle to base line	δ [deg.]	5	10	15	20 25

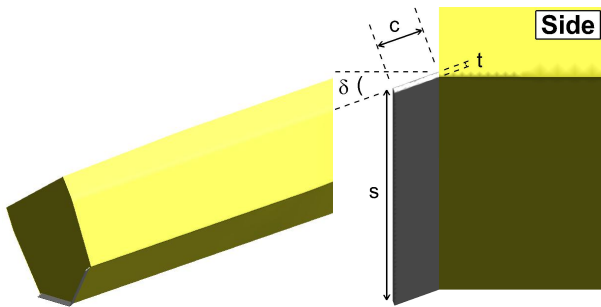


Fig. 2. Geometry of trim tab ($c=0.01L_{pp}$, $\delta=20^\circ$).

4. 수치해석

수치해석은 실선 주위의 유체를 고려하여 평균 해수(seawater) 온도인 15°C 조건에서 실선 스케일 CFD 해석을 수행했고(ITTC, 2011), 해석에는 STAR-CCM+ Ver. 13.02를 사용했다.

4.1 좌표계

해석에 사용된 좌표계가 Fig. 3에 도시되어 있다. x, y, z축은 각각 유동 방향, 우현, 중력 반대 방향이 양(positive)의 방향이고, 선체의 중경사와 침하량(sinkage)에 독립이면서 선체에 고정된 우수좌표계(fixed right-handed coordinate system)이

다. 원점(origin)은 선체의 중앙횡단면(midship)과 중심면(center plane) 그리고 선체에 의해 교란되지 않은 자유 수면(undisturbed free surface)이 교차하는 점이다.

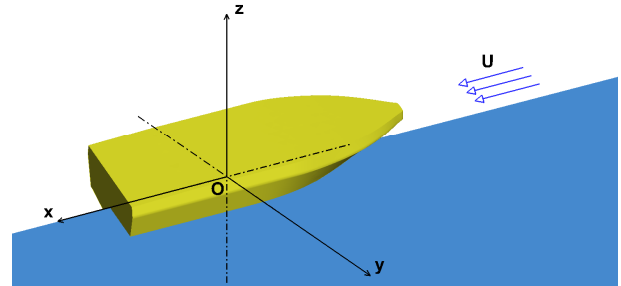


Fig. 3. Coordinate system.

4.2 해석 기법

지배방정식을 풀기 위해 계산 영역(domain)은 유한체적법(finite volume method)에 의하여 유한개의 작은 셀로 나뉘지고, 이산화(discretization) 과정을 거쳐 대수방정식(algebraic equation)으로 변환된다.

공간 이산화(space discretization)를 위해 중심 유한체적법(cell-centered finite volume method)이 사용됐고, 대류항(convective term)은 2차 풍상차분법(second-order upwind differencing scheme)에, 확산항(diffusion term)은 중앙차분법(central-differencing scheme)에 의해 이산화됐다.

압력-속도 연성(pressure-velocity coupling)을 위해 SIMPLE (Semi-Implicit Method of Pressure-Linked Equation) 알고리즘이 사용됐다.

외력에 반응하는 선체의 운동(motion) 해석에는 DFBI(Dynamic Fluid Body Interaction) 모듈(module)을 사용했고, 6 자유도(degree of freedom) 운동 중에서 z-축 평행 병진운동(heave)과 y-축 중심 회전운동(pitch)만 고려했다.

time step은 식(7)과 같이 Courant et al.(1967)이 제시한 CFL (Courant - Friedrichs - Lewy) 조건으로부터 결정된다.

$$C = \frac{|\bar{u}| \Delta t}{\Delta x} < C_{\max} \quad (7)$$

식(7)에서 $|\bar{u}|$ 는 국부 속도(local velocity), Δt 는 time step, Δx 는 유동 방향으로의 선형 길이(linear cell size)이고, CFL number는 단위 시간마다 유체 입자 1개가 지나치는 셀의 수를 뜻한다.

ITTC는 선박에 대한 CFD 해석에 있어 각 셀에서의 CFL number가 1보다 작아야 하고, two equation turbulence model (RKE 2L)이 사용된다면 $0.01 L/U$ 보다 작은 time step을 권장하고 있으므로 0.0025초로 해석을 수행했다(ITTC, 2014).

4.3 계산 영역 및 경계 조건

계산 영역(computational domain)과 경계 조건(boundary condition)이 Fig. 4에 도시되어 있다. 계산 영역은 직육면체 형태로 $-1.5 < x/L_{pp} < 4.5$, $0 < y/L_{pp} < 1.5$, $-1.0 < z/L_{pp} < 1.0$ 크기이며, 초기 조건에서 $-1.0 < z/L_{pp} < 0$ 은 물, $0 < z/L_{pp} < 1.0$ 은 공기 영역이다.

경계 조건은 선체 표면에 no-slip wall, 유입면에 velocity inlet, 유출면에 pressure outlet, 상면과 하면에 slip wall 조건을 적용했고, 선체 중심면과 측면은 symmetry plane 조건으로 선체의 반폭(half breadth)에 대해서만 해석을 수행했다.

해석 과정에서 선체로 인해 교란된 파(wave)가 경계면에서 반사되는 것을 방지하기 위해 $2.5 < x/L_{pp} < 4.5$ 에 격자 감쇠 영역(grid damping region)을, $3.7 < x/L_{pp} < 4.5$ 에 수치 감쇠 영역(numerical damping region)을 생성했다.

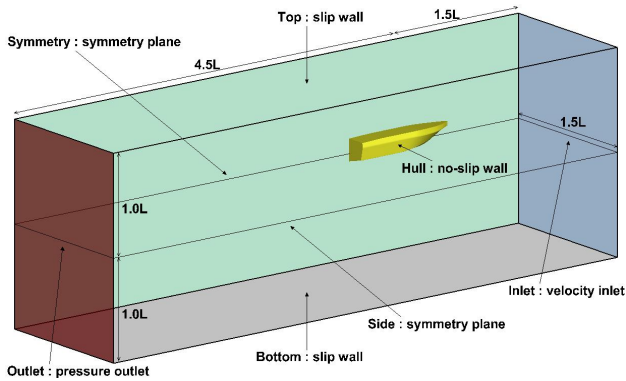
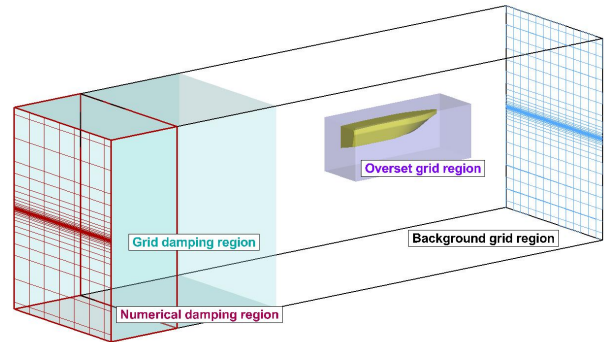


Fig. 4. Computational domain and boundary conditions.

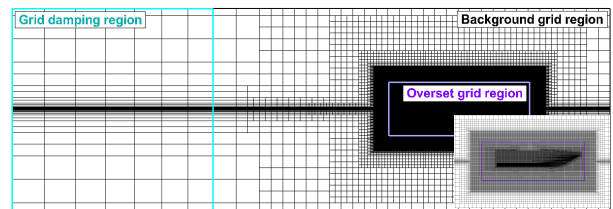
4.4 격자 생성

격자(grid)는 STAR-CCM+의 Trimmer(Trimmed mesher) 기법을 사용하여 직육면체 형태의 비정렬 격자(unstructured grid)를 생성했고, 선체 근방은 중첩 격자 기법(overset grid method)을 적용했다. 중첩 격자 기법이란 배경 격자 영역(background grid region)은 고정시킨 채 오직 중첩 격자 영역(overset grid region)만 선체를 따라 운동하게 하여, 운동이 큰 대상의 해석에 있어 격자를 효율적으로 배치한다. 중첩 격자 영역 또한 배경 격자 영역과 마찬가지로 직육면체 형태이며, $-0.7 < x/L_{pp} < 0.7$, $0 < y/L_{pp} < 0.5$, $-0.3 < z/L_{pp} < 0.3$ 크기이다.

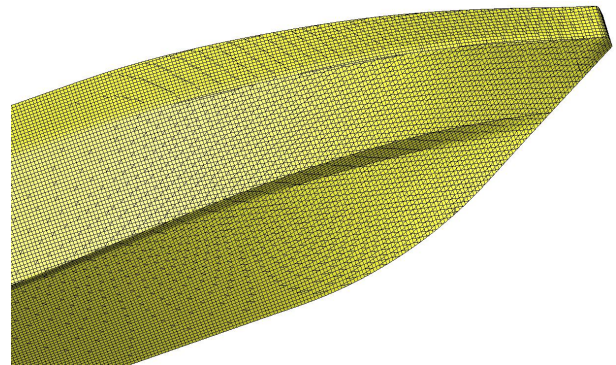
선체 표면의 경계층(boundary layer) 유동에 대하여 벽함수(wall function)를 사용해 해석하고자 프리즘 층(prism layer)을 선체 표면에 생성했다. 첫 층까지의 무차원화 거리(non-dimensional wall distance)인 y^+ 를 120으로, 확장비(expansion ratio)를 1.3으로 하여 총 6개 층을 생성했다.



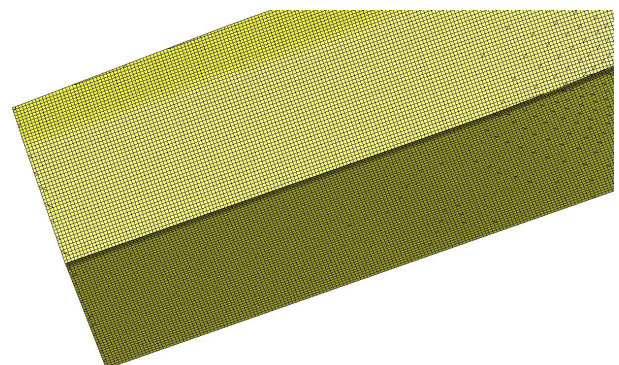
(a) Grid region



(b) Grid on symmetry plane of $y=0$



(c) Grid of hull surface near bow



(d) Grid of hull surface near stern

Fig. 5. Grid system.

자유 수면이 정밀하게 묘사되도록 자유 수면 근방에 조밀한 격자를 추가로 배치했고, 파가 반사되지 않도록 유동 방향 끝에 있는 경계면으로 갈수록 격자의 간격이 넓어지게끔 배치했다.

중첩 격자를 포함한 전반적인 격자의 배치가 Fig. 5에 도시되어 있다.

4.5 격자 검증

해석에 사용된 격자계(grid system)를 ITTC의 권고 지침과 절차에 따라 검증(verification)했다(ITTC, 2017). CFD 해석에 사용된 특정 매개변수(parameter)는 시뮬레이션의 수치적 오차(numerical error)와 수치적 불확실성(numerical uncertainty) 평가를 통해 검증된다.

특정 매개변수에 대한 수치적 오차와 불확실성을 추정하기 위해 식(8)과 같이 개선비(refinement ratio)를 해당 변수에만 적용하여 여러 차례 해석을 수행하고, 그 결과로부터 수렴성 연구(convergence study)가 수행된다.

$$r_i = \Delta x_{i,2} / \Delta x_{i,1} = \Delta x_{i,3} / \Delta x_{i,2} = \Delta x_{i,m} / \Delta x_{i,m-1} \quad (8)$$

식(8)에서 Δx_i 는 입력 매개변수(input parameter)로 수렴성 평가를 위해 최소 3개의 값이 요구되며, 수렴비(convergence ratio)는 식(9)와 같다.

$$R_i = \epsilon_{i,21} / \epsilon_{i,32} \quad (9)$$

식(9)에서 ϵ_i 는 개선비에 따른 해석 결과인 \hat{S}_i 간의 편차로 식(10), 식(11)과 같고, 아래 첨자 1, 2, 3은 차례대로 fine, medium, coarse의 조밀함을 뜻한다.

$$\epsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \quad (10)$$

$$\epsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \quad (11)$$

수렴 상태(convergence condition)는 수렴비에 따라 다음과 같이 정의된다.

(i) Monotonic convergence : $0 < R_i < 1$

(ii) Oscillatory convergence : $R_i < 0$

(iii) Divergence : $R_i > 1$

(i)의 경우 generalized RE(Richardson Extrapolation) 방법을 통해 수치적 오차(δ_i^*)와 불확실성(U_i)이 추정되고, (ii)의 경우 수치적 불확실성만이 식(12)와 같이 추정된다.

$$U_i = \frac{1}{2}(S_U - S_L) \quad (12)$$

식(12)에서 S_U 와 S_L 은 해석 결과가 진동(oscillation) 경향을 보일 때의 최대 및 최소값이다.

(iii)의 경우 해석 결과의 경향이 발산(divergence)하므로 수치적 오차와 불확실성의 추정이 불가능하다.

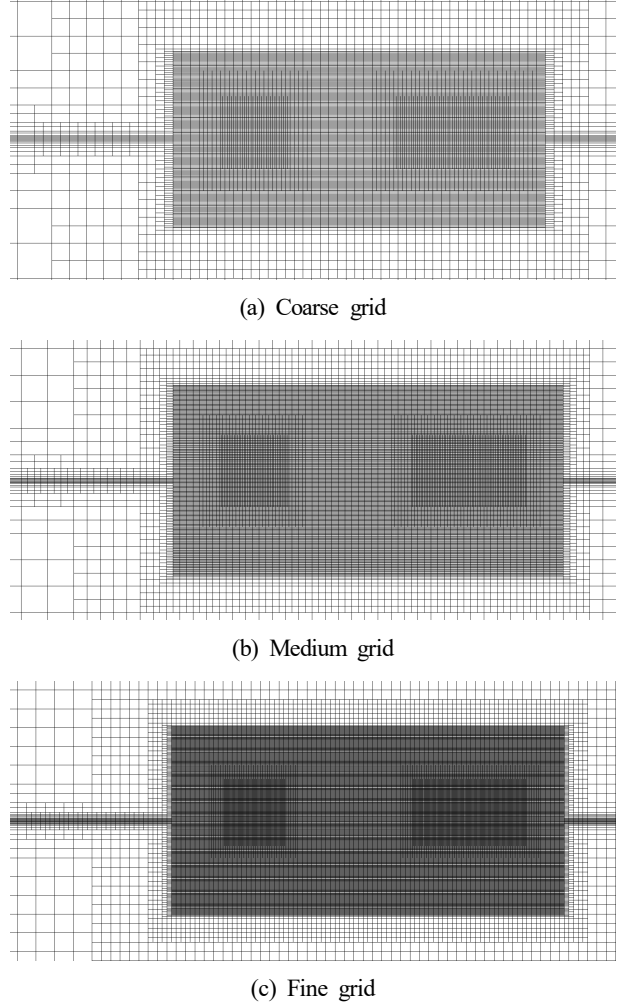


Fig. 6. Grid system used in convergence study.

Table 3. Results of convergence study

Fineness	Cell number	C_{TS} (e+3)	τ^* [deg.]	σ_S [m]
Coarse	843,486	12.7	-7.13	0.297
Medium	1,916,096	13.1	-7.25	0.300
Fine	4,685,967	13.4	-7.34	0.303

*Trim by bow is defined to be positive.

Table 4. Results of numerical error and uncertainty analysis

	C_{TS}	τ	σ_S
r_G		$\sqrt{2}$	
$\epsilon_{G,21}$	-0.253	0.085	-0.002
$\epsilon_{G,32}$	-0.387	0.120	-0.004
R_G	0.652	0.701	0.683
$\delta_{G,1}^*$	-0.253	0.085	-0.002
U_{G_c}	0.220	0.114	0.003
$U_{G_c} (\% \hat{S}_{G,1})$	1.65	1.55	0.949

Subscript ‘G’ means grid size and ‘C’ means corrected value.

본 연구에서는 격자 크기(grid size)에 $\sqrt{2}$ 의 개선비를 적용하여 실선의 전 저항 계수와 종경사각 그리고 침하량의 수렴성 연구를 수행했고, 해석에 사용된 격자계를 검증했다.

수렴성 연구에 사용된 격자계가 Fig. 6에, 그 결과가 Table 3에 도시되어 있다. 수렴 상태가 모두 (i)의 범위에 속하므로 수치적 오차와 불확실성의 추정에 generalized RE 방법을 사용했다. generalized RE 방법에 대한 설명은 ITTC Recommended Procedures and Guidelines(ITTC, 2017)에서 상세히 다루고 있다.

해석에 사용된 격자계의 검증 결과가 Table 4에 도시되어 있다. medium 격자계의 해석 결과 실선의 전 저항 계수(C_{TS})와 종경사각(τ) 그리고 침하량(σ_S)의 수치적 불확실성이 fine 격자계에 대해 2% 이하이므로 해석에 적합하다 판단했다.

5. 결 과

대상 선박의 나선(bare hull)과 부착된 트림 탭의 제원에 따른 항주자세 및 저항성능 해석 결과가 Table 5와 Fig. 7, Fig. 8에, 실선의 전 저항(R_{TS})이 압력저항(pressure resistance, R_{PS})과 전단저항(shear resistance, R_{SS}) 성분으로 구분되어 Table 6에 도시되어 있다. 트림 탭 각도는 5° 간격으로 증가시켰으며, 실선의 전 저항 곡선이 변곡점(inflexion point)을 보일 때 까지 해석을 수행했다. RR%는 나선의 저항성능과 비교했을 때 트림 탭이 부착된 경우의 전 저항 감소율(reduction ratio)이며, 식(13)과 같다.

$$RR\% = \frac{R_{w/trim\ tab} - R_{w/o\ trim\ tab}}{R_{w/o\ trim\ tab}} \times 100 \quad (13)$$

식(13)에서 R 은 실선의 전 저항이다.

양력(lift force)을 발생시켜 선박의 항주자세에 변화를 유발하는 원리에 따라 트림 탭의 부착에 의한 종경사각과 침하량의 변화는 트림 탭 각도가 증가할수록 선미트림(trim by stern)과 부상량(floatation)이 감소했고, 코드 길이가 증가할수록 동일한 각도에서의 감소량도 커졌다. 이때 선미트림과 부상량이 감소할수록 실선의 압력저항이 감소했으며, 전단저항은 증가했다. 대상 선박처럼 높은 Froude 수로 운항하는 활주형 선박(planing vessel)은 압력저항의 비중이 높은 특성을 갖는데, 이로부터 항주자세 변화 시 전단저항에 비해 압력저항이 저항성능에 큰 영향을 미쳤다.

저항 성분의 증감에 따라 전 저항은 트림 탭 코드 길이가 L_{pp} 의 0.5, 1.5%인 경우 트림 탭 각도가 증가할수록 초기에는 감소하다가 이후 감소율이 줄어드는 경향을 보였지만, 1.0%의 경우에는 계속해서 감소했다. 하지만 나머지 2개 코드 길이에서 각각 1.81°와 1.52°의 선미트림일 때 저항 감소율이 최대였으므로, L_{pp} 의 1.0%인 경우에도 유사한 경향성을 보일 것이라는 추측이 가능했다. 이에 따라 비슷한 항주자세에서의 저항성능을 확인하기 위해 트림 탭 각도가 13°, 14°일 때의 해석을 추가로 수행했고, 1.59°의 선미트림에서 변곡점을 찾을 수 있었다. 이때 트림 탭 코드 길이에 따른 대상 선박의 최대 저항 저감율은 약 27%로 유사했다.

Table 5. Running attitude and resistance performance of target ship

c [m]	δ [deg.]	R_{TS} [kN]	τ^* [deg.]	σ_S [m]	RR%
Bare hull					
	5	15.1	-6.06	0.266	-10.0
0.045 (0.5% of L_{pp})	10	14.3	-4.94	0.240	-14.6
	15	13.1	-3.75	0.209	-21.6
	20	12.2	-1.81	0.162	-27.0
	25	12.4	-0.897	0.142	-25.9
0.090 (1.0% of L_{pp})	5	14.5	-5.28	0.247	-13.6
	10	13.1	-3.55	0.203	-21.8
	13	12.2	-1.59	0.155	-27.0
	14	12.3	-1.31	0.149	-26.6
	15	12.4	-1.03	0.143	-26.0
0.135 (1.5% of L_{pp})	20	12.3	0.087	0.132	-26.2
	5	14.0	-4.70	0.233	-16.4
	10	12.3	-1.52	0.153	-26.7
	15	12.4	-0.002	0.132	-26.0

*Trim by bow is defined to be positive.

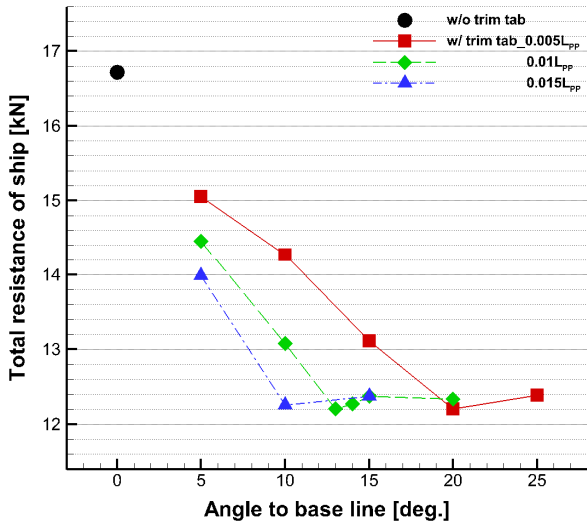


Fig. 7. Resistance performance of target ship

Table 6. Resistance components of target ship

c	δ [deg.]	R_{TS} [kN]	R_{ES} [kN]	R_{SS} [kN]	RR%
0.045 (0.5% of L_{pp})	Bare hull	16.7	15.1	1.60	-
	5	15.1	13.2	1.84	-10.0
	10	14.3	12.2	2.06	-14.6
	15	13.1	10.8	2.31	-21.6
	20	12.2	9.44	2.76	-27.0
0.090 (1.0% of L_{pp})	5	14.5	12.4	2.01	-13.6
	10	13.1	10.7	2.35	-21.8
	13	12.2	9.40	2.80	-27.0
	14	12.3	9.38	2.89	-26.6
	15	12.4	9.38	2.99	-26.0
0.135 (1.5% of L_{pp})	20	12.3	9.30	3.04	-26.2
	5	14.0	12.0	1.99	-16.4
	10	12.3	9.36	2.89	-26.7
	15	12.4	9.30	3.08	-26.0

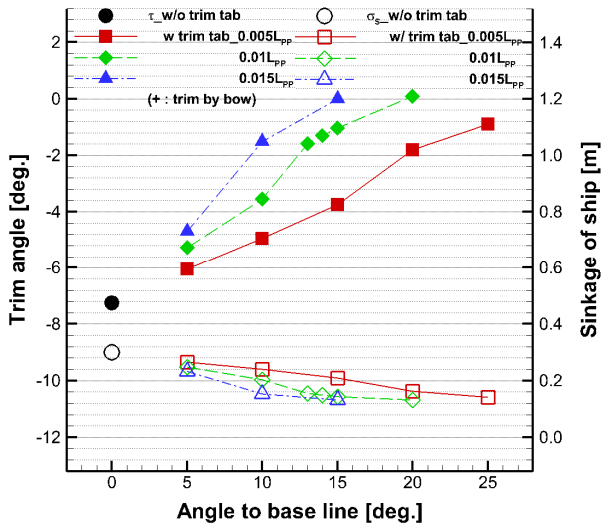


Fig. 8. Running attitude of target ship.

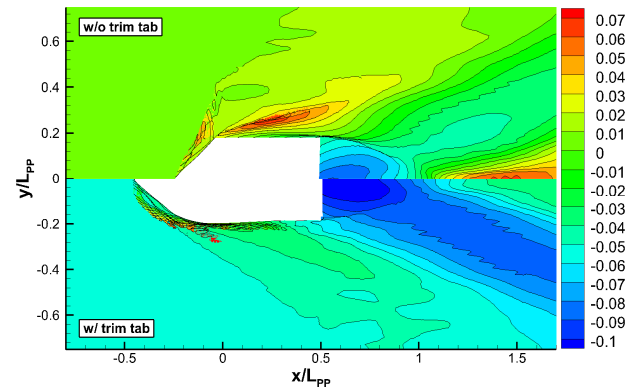


Fig. 9. Wave pattern near hull according to application of trim tab ($c=0.01L_{pp}$, $\delta=13^\circ$).

부착된 트림 탭의 코드 길이가 L_{pp} 의 1.0%, 각도가 13° 일 때의 L_{pp} 에 대해 무차원화 된 선체 주위 파형(wave pattern), 선측 파고(wave profile)가 Fig. 9와 Fig. 10에, 식(14)와 같이 무차원화 된 선체 압력 분포(pressure distribution)가 Fig. 11에 도시되어 있고, 나선의 경우와 비교되고 있다.

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho V^2} \quad (14)$$

식(14)에서 p 는 선체가 받는 압력, p_0 는 정수압, ρ 는 유체 밀도, V 는 유속(선속)이다.

자유 수면과 맞닿으며 선수파가 생성되는 선수부의 위치가 앞쪽으로 옮겨감에 따라 선수에서 발생하는 물보라(spray)의 크기가 커졌고, 선수파와 어깨파의 파고는 높아진 반면 선미파의 파고는 낮아졌다. 이에 따라 높은 압력을 받는 선수부의 면적이 감소한 반면 트림 탭의 돌출로 인해 선미부에 높은 압력이 추가로 발생했지만, 선체가 받는 전반적인 압력의 크기가 감소함에 따라 전 저항이 줄었다.

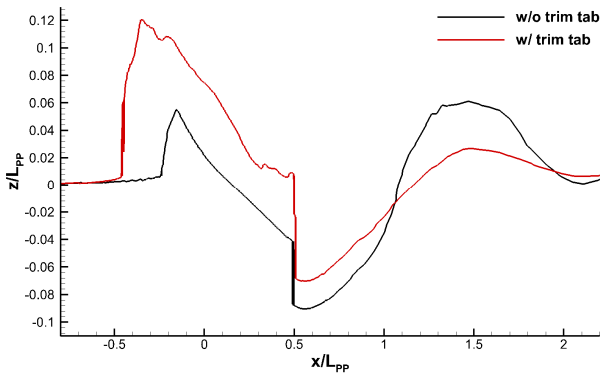
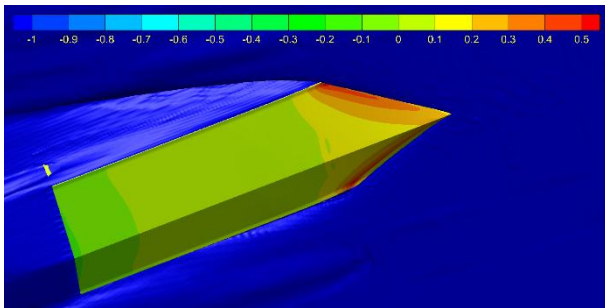
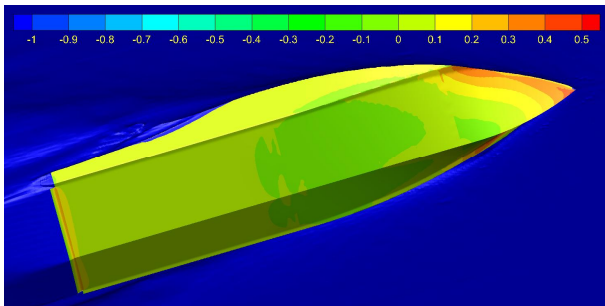


Fig. 10. Wave profile on hull according to application of trim tab ($c=0.01L_{pp}$, $\delta=13^\circ$).



(a) Hull without trim tab



(b) Hull with trim tab

Fig. 11. Pressure distribution on hull according to application of trim tab ($c=0.01L_{pp}$, $\delta=13^\circ$).

6. 결론

본 연구에서는 소형 고속선의 저항성능과 승선감을 향상시키기 위해 트림 탭을 사용하여 항주자세를 제어했고, 트림 탭의 코드 길이와 선저 면과의 각도를 변화시켜가며 트림 탭 제원에 따른 개선 결과를 비교했다. 수치해석은 상용 소프트웨어를 사용한 CFD 해석을 수행했으며, 본 연구에 앞서 선행 연구를 통해 스케일에 따른 해석 결과의 차이를 확인했다. 이에 따라 스케일에 의한 오차를 줄이고자 실선 스

케일에서 해석을 수행했고, 해석 결과를 토대로 트림 탭의 유무가 항주자세와 저항성능에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 나선의 선미부에 부착된 트림 탭에 의해 양력이 발생하여 선박의 선미트림과 부상량이 감소하는 방향으로 항주자세가 제어됐고, 이 효과는 트림 탭의 코드 길이가 길수록, 선저 면과의 각도가 클수록 증가했다.
- 선박의 선미트림과 부상량이 감소할수록 선체의 침수 표면적(wetted surface area)이 넓어지며 실선의 전단저항은 증가했고, 전반적인 압력 분포의 감소와 함께 압력 저항은 감소했다.
- 실선의 전 저항 저감율은 전단저항과 압력저항의 증감에 의존적이고, 트림 탭에 의한 항주자세 제어 초기에는 압력저항의 감소가 지배적이므로 저감율이 계속해서 증가하다가 변곡점이 나타났다.
- 트림 탭의 제원에 따라 항주자세 제어 정도에는 차이가 있었지만, 저항성능이 가장 좋은 최적 항주자세는 코드 길이가 L_{pp} 의 0.5, 1.0, 1.5%일 때 각각 1.81° , 1.59° , 1.52° 의 선미트림으로 특정되며 큰 차이를 보이지 않았다.
- 트림 탭 코드 길이가 L_{pp} 의 1.0%인 경우의 해석 결과를 토대로 항주자세가 선수트림(trim by bow)일 때 저항성능의 추가적인 개선 가능성이 있지만, 승선감을 고려한다면 최적 항주자세로는 적합하지 않다고 판단된다.

본 연구에서 대상 선박의 저항성능과 승선감을 고려하여 특정된 최적 항주자세는 무시할 수 없는 크기의 부가물 저항(appendage resistance)을 유발하지 않는 한, 상황과 조건에 적합한 트림 탭이나 그 외 부가물, ESD(Energy Saving Device) 등을 이용한 항주자세 제어 시도에 활용이 가능할 것으로 사료된다. 따라서 가변적인 해상 상태와 운항 조건을 고려하여 설계 선속 외에도 다양한 선속과 흘수에서의 추가적인 해석을 통한 데이터의 축적이 필요하다.

후 기

이 연구는 2019학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다(2019A021).

References

- [1] Arolla, S. K. and P. A. Durbin(2013), Modeling Rotation and Curvature Effects within Scalar Eddy Viscosity Model Framework, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 39, pp. 78-89.

- [2] CD-adapco(2018), STAR-CCM+ User Guide, Ver. 13.02.
- [3] Courant, R., K. Friedrichs, and H. Lewy(1967), On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics, International Business Machines Corporation(IBM) Journal of Research and Development, Vol. 11, No. 2, pp. 215-234.
- [4] Farkas, A., N. Degiuli, and I. Martić(2018), Assessment of Hydrodynamic Characteristics of a Full-scale Ship at Different Draughts, Ocean Engineering, Vol. 156, pp. 135-152.
- [5] Ferziger, J. H. and M. Perić(2002), Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Edition, Springer, Germany, pp. 292-294.
- [6] Harvald, S. A.(1983), Resistance and Propulsion of Ships, John Wiley & Sons, USA, pp. 98-100.
- [7] Hochkirch, K. and B. Mallol(2013), On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, Proceedings of the 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT), Cortona, April 2013, pp. 85-95.
- [8] International Towing Tank Conference(ITTC)(1999), Performance, Propulsion, 1978 ITTC Performance Prediction Method, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-03-01.4, pp. 3-4.
- [9] International Towing Tank Conference(ITTC)(2011), Fresh Water and Seawater Properties, Recommended Procedures, 7.5-02-01-03, pp. 3-9.
- [10] International Towing Tank Conference(ITTC)(2014), Practical Guidelines for Ship CFD Applications, Practical Guidelines for Ship CFD Applications, 7.5-03-02-03, pp. 16.
- [11] International Towing Tank Conference(ITTC)(2017), Uncertainty Analysis in CFD, Verification and Validation Methodology and Procedures, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-01-01, pp. 4-8.
- [12] Lee, J. H. and D. W. Park(2021), A Study on the Scale Effect and Improvement of Resistance Performance Based on Running Attitude Control of Small High-Speed Vessel, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 4, pp. 538-549.
- [13] Niklas, K. and H. Pruszko(2019), Full Scale CFD Seakeeping simulations for Case Study Ship Redesigned from V-shaped Bulbous Bow to X-bow Hull Form, Applied Ocean Research, Vol. 89, pp. 188-201.
- [14] Sarkar, S. and L. Balakrishnan(1991), Application of a Reynolds-stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal, Vol. 29, No. 5, pp. 743-749.
- [15] Spalart, P. R. and C. L. Rumsey(2007), Effective Inflow Conditions for Turbulence Models in Aerodynamic Calculations, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal, Vol. 45, No. 10, pp. 2544-2553.
- [16] Todd, F. H.(1957), Skin Friction and Turbulence Stimulation, Proceedings of the 8th ITTC Conference, Madrid, September 1957, pp. 71-227.

Received : 2021. 06. 22.

Revised : 2021. 08. 03.

Accepted : 2021. 08. 27.