

## 선박 선미부 핀 부착에 의한 저항성능 및 유동 특성에 관한 연구

이종현\* · 김인섭\*\* · 박동우\*\*\*†

\* 동명대학교 조선해양시뮬레이션센터 연구원, \*\* 한국해양교통안전공단 스마트안전연구실 실장,

\*\*\* 동명대학교 조선해양공학부 교수

## A Study on the Resistance Performance and Flow Characteristic of Ship with a Fin Attached on Stern Hull

Jonghyeon Lee\* · Inseob Kim\*\* · Dong-Woo Park\*\*\*†

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

\*\* Office manager, Smart Safety Research Department, Korea Maritime Transportation Safety Authority, Sejong, 30100, Korea

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

**요약** : 본 연구에서는 80k Bulk carrier의 저항성능 향상을 목적으로 선미부에 1개의 핀을 부착해 선미 유동을 제어하였고, 저항성능 및 반류의 변화를 분석하였다. 부착된 핀은 직사각형 단면을 가지며, 길이와 폭, 두께는 고정된 채 길이 및 흡수 방향 부착 위치와 유선에 대한 각도만 변화가 있었다. 나선 및 핀이 부착된 선체에 대한 모형 스케일에서의 CFD 해석이 수행되었고, 그 결과를 실선 확장 후 비교하였다. 핀은 프로펠러로 유입되는 빌지 볼텍스의 경로를 선미 트랜섬 쪽으로 변화시켰고, 이는 프로펠러 상부와 선미부의 압력을 증가시켰다. 이로 인해 선체의 압력저항 및 전 저항이 감소되었으며, 감소율은 핀의 부착 위치가 선미 및 선저와 가까울수록 높았다. 또한 핀은 공칭반류를 감소시켰는데 핀의 각도가 커질수록 반류의 변화가 컸고, 전 저항 저감률은 최대가 되는 특정 각도까지만 비례하였다. 대상 선박에 단일 핀을 부착했을 시의 최대 전 저항 저감률은 약 2.1%였고, 선미로부터 수선간장의 12.5%, 선저로부터 흡수의 10% 위치에 14°의 각도로 부착했을 때이다.

**핵심어** : 80k 벌크선, 핀, 선미 유동, 저항성능, 반류, 전산유체역학

**Abstract** : In this study, a fin that controls ship stern flow was attached on stern hull of a 80k bulk carrier to improve resistance performance. The rectangular cross-sectional fin was attached at several locations on the hull, and angle to streamline was changed with constant length, breadth, and thickness. The resistance performance and wake on propeller plane of the hull with and without the fin were analyzed using model-scale computational fluid dynamics simulation. The analysis results were extrapolated to full-scale to compare the performance and wake of the full-scale ship. First, the fin changed path of bilge vortex that flowed into the propeller along the stern hull without the fin to transom stern. This change increased pressure of the stern hull and upper region of the propeller, so pressure resistance and total resistance of the hull were reduced - the nearer the fin location to after perpendicular (AP) and base line of the hull, the larger the reduction of the resistances. Second, nominal wake fraction of the hull with the fin was lower than that without the fin. This difference was in proportion to the angle of the fin, but the total resistance reduction was in proportion until a certain angle at which the reduction was maximum. The largest total resistance reduction was approximately 2.1% at 12.5% of length between perpendiculars from the AP, 10% of draft from the base line, and 14° with respect to the streamline.

**Key Words** : 80k bulk carrier, Fin, Ship stern flow, Resistance performance, Wake, Computational fluid dynamics

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

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

## 1. 서론

산업의 발전에서 초래된 환경 문제의 심각성은 전 세계적으로 대두되고 있는 이슈이며, 이는 특정 분야에 국한되지 않고 선박 또한 예외는 아니다. 이에 따라 다양한 관련 규제가 만들어지거나 강화되고 있는데, 2018년 IMO(International Maritime Organization)는 2008년을 기준으로 하여 2050년까지 선박이 배출하는 온실가스의 총량을 50%, 탄소집약도(Carbon Intensity Indicator, CII)를 70%까지 단계적으로 낮추겠다는 GHG(Greenhouse Gas) 전략을 발표하였다.

GHG 전략은 기간에 따라 단기, 중기 그리고 장기 조치로 나누어지고, 단기 조치 중 하나로 신조선에 적용되는 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 외에 현존선에 대해서도 EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index)와 CII 등급제를 적용하는 기술적 및 운항적 조치가 2023년부터 발효될 예정이다. 이때 EEXI 규정은 설계 단계에서 EEDI 규정이 적용된 선박과 적용되지 않은 선박 모두에게 적용되는데, 현존선 중 EEDI 규정이 적용되지 않고 건조된 선박의 대다수가 EEXI 규정을 만족시키지 못하는 실정이다. 또한 EEDI 규정이 적용된 선박의 경우에도 전부가 EEXI 규정을 만족시키는 것은 아니며, 이를 만족시킨다 하더라도 갈수록 강화되는 CII 기준에서 낮은 등급을 받을 시 불이익 또는 퇴출의 가능성이 있다.

따라서 곧 발효될 조치를 대비하여 EEXI 규정 만족과 높은 CII 등급을 위한 노력은 현존선에게 주어진 과제이다. 목표는 현재의 운항 속도를 유지하며 규정을 만족시키는 것인데 그렇지 못하는 경우 엔진의 출력이 제한되어 선속이 감소하고, 이는 운항 일수의 증가로 이어져 경제적 손실을 야기할 것이다. 이를 피하기 위해 에너지 저감은 필수 불가결의 요소이며, 그 방법으로는 연료의 변환이나 저항성능의 향상 등이 있다. 그중 연료의 변환은 새로운 연료 및 추진 시스템의 도입이 필요하고, 저항성능은 ESD(Energy Saving Device)의 장착 등을 통해 증가시킬 수 있다.

ESD의 장착은 상대적으로 작은 규모의 장치를 장착하여 변화를 유발할 수 있어 현존선뿐만 아니라 신조선의 설계에도 다양하게 활용되는 방법인데, 목적에 따라 선체에 평판 또는 핀(fin)을 부착하여 선체 주위의 유동을 제어하는 다양한 연구들이 수행되었다. Samsung Heavy Industry(2007)는 선박의 선미부에 단면이 직사각형, 사다리꼴 또는 삼각형인 3개의 핀을 부착해 프로펠러 상하부 유입유동을 제어하는 압력저항 및 진동 개선용 유동제어장치에 대한 특허를 등록하였다. Park et al.(2009)은 KCS를 대상으로 프로펠러 유입유동을 제어하기 위해 선미부에 평판을 부착하였고, 수치해석을 통해 프로펠러 면에서의 유속분포 등을 비교함으로써 추진 성능이 개선됨을 확인하였다. Wie and Kim(2012)은 KVLCC2

를 대상으로 선미 유동을 제어하기 위해 선미부에 대칭 익형(NACA 0012) 단면의 핀을 부착하였고, 수치해석을 통해 점성저항(viscosity resistance)과 반류분포(wake distribution) 등을 비교함으로써 이들의 상관관계와 반류분포의 균일성이 향상됨을 확인하였다. Ram et al.(2015)은 post-Panamax급 CV(Container Vessel)를 대상으로 선수 유입유동을 제어하기 위해 선수부에 대칭 익형(NACA 0018) 단면의 핀을 부착하였고, 수치해석과 모형시험을 통해 선체 주위의 파형(wave pattern)과 선측 파고(wave profile) 등을 비교함으로써 선수파와 저항성능이 개선됨을 확인하였다. Kim et al.(2016)은 24K Tanker를 대상으로 프로펠러 상단 유입유동을 제어하기 위해 선미부에 수직판을 부착하였고, 수치해석을 통해 전 저항(total resistance) 계수와 공칭반류(nominal wake fraction) 등을 비교함으로써 저항성능과 반류분포가 개선됨을 확인하였다.

본 연구에서는 현존선인 80k Bulk carrier의 EEXI 규정 만족 및 CII 등급을 상승시키기 위해 여러 ESD의 조합을 통한 저항성능 개선 과정의 일환으로, 선미부에 핀을 부착하여 선미에서 프로펠러로 유입되는 유동을 제어하였다. 핀의 부착 위치와 유선(streamline)과의 각도에 따른 저항성능 및 반류(wake)의 변화는 실선을 축소시킨 모형선에 대한 수치해석을 통해 확인하였고, 이때 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+를 사용한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였다. 모형선에 대한 해석 결과는 실선 확장(extrapolation)하였고, 실선의 전 저항과 프로펠러 면에서의 반류분포, 공칭반류 등을 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 지배방정식

유체 흐름에 대한 지배방정식(governing equation)은 연속방정식(continuity equation)과 운동량방정식(momentum equation)이며, 비압축성 유체(incompressible fluid)를 가정하면 다음과 같이 직교 좌표(cartesian coordinates)에 대한 텐서로 표기된다(Ferziger and Perić, 2002).

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

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

이때 식(2)는 앙상블 평균화(ensemble averaging)된 운동량 방정식으로 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식이다. 식(1), 식(2)에서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\bar{u}_i$ 와  $\bar{u}_j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ )는  $x_i$ 와  $x_j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 방향에 대한 평균 유속,  $\bar{p}$ 는 평균 압력,  $\mu$ 는 유체의 점성 계수(dynamic viscosity),  $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 는 Reynolds 응력,  $\bar{g}_i$ 는 중력가속도이다.

## 2.2 난류 모델

선체 주위 난류 유동의 예측에 주로 사용되는 난류 모델(turbulence model)의 종류와 각 모델의 특성을 저자의 이전 논문(Lee and Park, 2021)에서 자세하게 설명하고 있다. 본 연구에서는 선미부에 부착된 핀에 의한 유동의 변화와 프로펠러 면에서의 반류분포 같은 복잡한 난류 유동의 예측이 필요하였으므로, RST(Reynolds Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.

RST 모델은 식(2)의 Reynolds 응력을 직접 계산하기 위한 6개의 수송방정식(transport equation)과 등방성 난류 소산율(isotropic turbulent dissipation rate)에 대한 1개의 수송방정식으로 구성된다. 먼저 Reynolds 응력에 대한 수송방정식은 다음과 같이 텐서로 간략하게 표기된다(CD-adapco, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{R}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{R} \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \mathbf{D} + \mathbf{P} + \mathbf{G} - \frac{2}{3} \rho \mathbf{I} \gamma_M + \phi + \frac{2}{3} \epsilon \mathbf{I} \quad (3)$$

식(3)에서  $\mathbf{R}$ 은 Reynolds 응력 성분,  $\bar{\mathbf{v}}$ 는 평균 유속,  $\mathbf{D}$ 는 Reynolds 응력 확산항(diffusion term),  $\mathbf{P}$ 는 난류 생성항(production term),  $\mathbf{G}$ 는 부력 생성항,  $\mathbf{I}$ 는 단위 텐서,  $\gamma_M$ 은 팽창(dilatation) 소산항(dissipation term),  $\phi$ 는 압력-변형률항(pressure-strain term),  $\epsilon$ 은 난류 소산율(dissipation rate)이다.

여기서 Reynolds 응력 성분  $\mathbf{R}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{R} = \overline{u'_i u'_j} = \begin{pmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_1 u'_3} & \overline{u'_2 u'_3} & \overline{u'_3 u'_3} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Reynolds 응력 확산항  $\mathbf{D}$ 는 다음과 같다(Lien and Leschziner, 1994).

$$\mathbf{D} = \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \mathbf{R} \quad (5)$$

식(5)에서  $\mu_t$ 는 난류의 점성(turbulent viscosity),  $\sigma_k$ 는 모델 계수(model coefficient)이다.

난류 생성항  $\mathbf{P}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{P} = -\rho (\mathbf{R} \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}^T + \nabla \bar{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{R}^T) \quad (6)$$

밀도가 일정한 유동에 대한 부력 생성항  $\mathbf{G}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{G} = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} (\nabla \bar{T} \cdot \mathbf{g}) \quad (7)$$

식(7)에서  $\beta$ 는 열팽창(thermal expansion) 계수,  $Pr_t$ 는 난류 Prandtl 수,  $\bar{T}$ 는 평균 온도,  $\mathbf{g}$ 는 중력가속도 벡터이다.

팽창 소산항  $\gamma_M$ 은 다음과 같다(Sarkar and Balakrishnan, 1991).

$$\gamma_M = \frac{C_M k \epsilon}{c^2} \quad (8)$$

식(8)에서  $C_M$ 은 모델 계수,  $k$ 는 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy),  $c$ 는 음속(speed of sound)이다.

압력-변형률항  $\phi$ 를 정의하기 위해 다음과 같이 Gibson and Launder(1978)이 제안한 선형 모델을 사용하였다.

$$\phi = \phi_s + \phi_r + \phi_{r,b} + \phi_{1w} + \phi_{2w} \quad (9)$$

식(9)에서 아래 첨자  $s$ 는 slow,  $r$ 은 rapid,  $r,b$ 는 buoyancy contribution,  $1w$ 는 slow wall-reflection,  $2w$ 는 rapid wall-reflection을 의미한다.

이때 선형 모델과 함께 Rodi(1991)가 제안한 Two-layer 모델을 함께 사용하였는데, 이는 벽(wall)과의 거리가 가까운 유동과 먼 유동을 나누어 난류 소산율  $\epsilon$ 과 난류의 점성  $\mu_t$ 를 각각 벽으로부터의 거리에 대한 함수와 수송방정식으로부터 계산한다.

다음으로 난류 소산율에 대한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} \left[ C_{\epsilon 1} \left( \frac{1}{2} \text{tr}(\mathbf{P}) + \frac{1}{2} C_{\epsilon 3} \text{tr}(\mathbf{G}) \right) - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon \right] \quad (10)$$

식(10)에서  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $C_{\epsilon 3}$ 는 모델 계수이고,  $\text{tr}$ 은 텐서의 대각합(trace)을 의미한다.

RST 난류 모델과 각 항에 대해서는 STAR-CCM+ User Guide (CD-adapco, 2018)에서 자세하게 설명하고 있다.

### 2.3 자유 수면

본 연구에서는 VOF(Volume of Fluid) 모델을 사용해 자유 수면(free surface)을 모사하였는데, 이는 자유 수면 위아래의 물과 공기처럼 섞이지 않는 유체들의 경계면(interface) 분포와 이동을 예측한다. VOF 모델의 수송방정식은 다음과 같다 (CD-adapco, 2018).

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_m \bar{u}_j) = 0 \quad (11)$$

식(11)에서  $\alpha_m$ 은 유체의 체적 분율(volume fraction)이다.

VOF 모델과 유체의 체적 분율에 대해서는 STAR-CCM+ User Guide(CD-adapco, 2018)에서 자세하게 설명하고 있다.

## 3. 연구 대상

### 3.1 대상선

본 연구의 대상 선박은 현재 운항하고 있는 약 220 m 급 길이의 80k Bulk carrier이고, 대상 선박의 주요 제원(main particular)을 Table 1, 선도(lines)를 Fig. 1에 도시하였다.

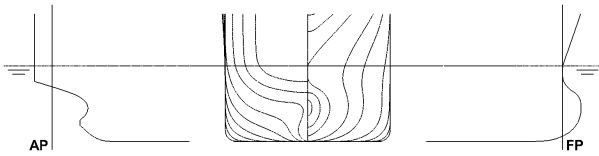


Fig. 1. Body plan and side view of target ship.

Table 1. Main particulars of target ship

Designation	Symbol [unit]	Ship	Model
Scale ratio	$\lambda$	34.154	
Froude number	$F_n$	0.153	
Reynolds number	$R_n$	1.37e+9	7.15e+6
Design speed	$V$ [knot] [m/s]	14.0	7.202 1.232
Length between perpendiculars	$L_{BP}$ [m]	222.0	6.500
Length of waterline	$L_{WL}$ [m]	225.5	6.602
Breadth	$B$ [m]	32.26	0.945
Draft	$T$ [m]	14.64	0.429
Wetted surface area	$S$ [m <sup>2</sup> ]	12378	10.61
Transverse area above waterline	$A_T$ [m <sup>2</sup> ]	568.0	221.7
Displacement volume	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	90815	2.279

### 3.2 핀

본 연구에서는 선미부 프로펠러 유입유동을 제어하여 대상 선박의 저항성능을 개선시키기 위해 선미부에 직사각형 단면의 핀을 부착하였다. 핀의 길이와 폭, 두께는 일정하게 유지한 채 선체의 길이와 흘수(draft) 방향으로 부착 위치를 변화시켰고, 선체 표면의 법선 방향과 평행하도록 부착하였다. 그 후 각 위치에서 Fig. 2와 같이 핀이 부착되지 않은 나선(bare hull)의 유선과 평행할 때를 0°, 시계 방향을 양의 방향으로 정의한 핀의 각도( $\alpha_F$ )에 변화를 주었다.

핀의 주요 제원과 길이, 흘수 방향으로의 부착 위치 및 각도를 Table 2에 도시하였다. 여기서 ST(Station)는  $L_{BP}$ 를 20개의 등간격으로 나눈 뒤, 선미 수선(After Perpendicular, AP)부터 선수 수선(Forward Perpendicular, FP)까지 차례대로 번호를 부여한 것으로, AP와 FP는 각각 0과 20ST이다. 그리고 핀의 부착 위치를 Fig. 2와 같이 4개의 영역(zone)으로 구분하였다.

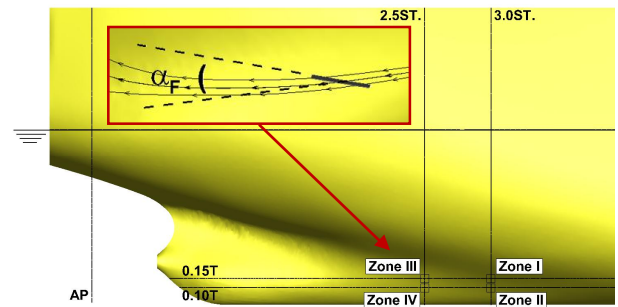


Fig. 2. Definition of fin location and angle.

Table 2. Main particulars, location and angle of fin

Designation	Symbol [unit]	Ship	Model
Length	$c$	0.01 $L_{BP}$	
Breadth	$b$	0.002 $L_{BP}$	
Thickness	$t$ [m]	0.03	8.78e-4
Location	x-dir.	$x_F$	2.5 & 3.0ST.
	z-dir.	$z_F$	0.10 & 0.15T
Angle to streamline	$\alpha_F$ [deg.]	10, 11, 12, 13, 14, 15	

## 4. 수치해석

본 연구에서는 모형선을 대상으로 CFD 해석을 수행하였고, 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+ Ver. 13.02를 사용하였다. 이때 모형선 주위 유체의 온도는 평균 해수(seawater) 온도와 동일한 15°C의 담수(fresh water)이고(ITTC, 2011), 대상 선박의 설계 속도(design speed)인 14.0 knots에 대해 해석을 수행하였다.

#### 4.1 좌표계

수치해석 시의 좌표계는 Fig. 3과 같이 x-축은 유동 방향, y-축은 우현, z-축은 중력 반대 방향을 양으로 정의하였고, 선체에 고정되어 선체의 중경사(trim) 및 침하량(sinkage)과 독립된 우수좌표계(fixed right-handed coordinate system)이며, 원점은 선체의 중앙횡단면(midship), 중심면(center plane), 선체에 의해 교란되지 않은 자유 수면(undisturbed free surface)이 교차하는 점이다.

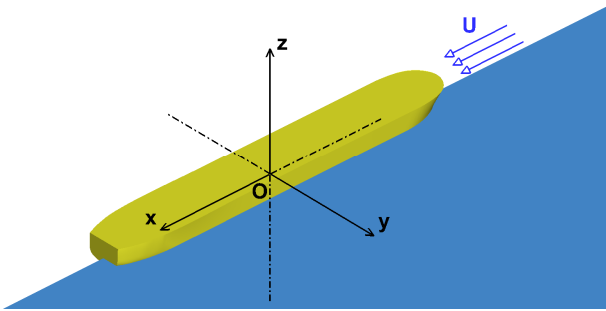


Fig. 3. Coordinate system.

#### 4.2 해석 기법

지배방정식을 이산화하여 대수방정식으로 변환하기 위해 계산 영역(domain)을 유한한 작은 셀로 나누는 유한체적법(finite volume method)이 사용되었다(CD-adapco, 2018). 공간 이산화에는 중심 유한체적법(cell-centered finite volume method), 대류항(convective term) 이산화에는 2차 풍상차분법(second-order upwind differencing scheme), 확산항(diffusion term) 이산화에는 중앙차분법(central-differencing scheme), 압력-속도 연성(pressure-velocity coupling)에는 SIMPLE(Semi-Implicit Method of Pressure-Linked Equation) 알고리즘, 선체 운동의 해석에는 DFBI(Dynamic Fluid Body Interaction) 모듈이 사용되었고, 선체의 6 자유도(Degrees Of Freedom, DOF) 운동 중 z-축 평행 병진운동(heave)과 y-축 중심 회전운동(pitch)을 제외한 나머지 운동은 구속한 채 해석하였다.

time step은 CFL(Courant - Friedrichs - Levy) 조건(Courant et al., 1967)과 ITTC(International Towing Tank Conference)의 권고(ITTC, 2014)에 따라 0.01초로 해석하였다. CFL 조건과 ITTC에서 권고하는 사항은 저자의 이전 논문(Lee and Park, 2021)에서 자세하게 설명하고 있다.

#### 4.3 계산 영역 및 경계 조건

계산 영역(computational domain)과 경계 조건(boundary condition)을 Fig. 4에 도시하였다. 초기에는 z 값이 0인 자유 수면을 기준으로 아래쪽 영역은 물, 위쪽 영역은 공기이고, 선체의 반폭(half breadth)에 대해서만 해석하였다. 이때 유동

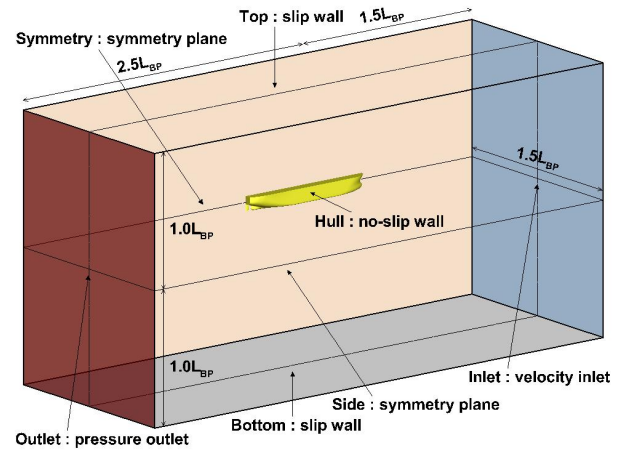


Fig. 4. Computational domain and boundary conditions.

방향 끝 경계면에서의 반사파(reflection wave) 생성을 방지하기 위해  $3.7 < x/L_{BP} < 4.5$ 에 수치 감쇠 영역(numerical damping region)을 생성하였다.

#### 4.4 격자 생성

격자(grid)는 STAR-CCM+의 Trimmer(Trimmed mesher) 시스템을 사용해 직육면체 형태의 비정렬 격자(unstructured grid)를 생성하였고, 선체 표면 근처의 경계층(boundary layer) 유동을 고려하기 위해 y+가 120, 확장비(expansion ratio)가 1.3인 총 6개 층의 프리즘 층(prism layer)을 생성하였다. 격자의 전반적인 배치는 Fig. 5와 같이 자유 수면 근처에 조밀한 격자를 배치하여 자유 수면이 잘 묘사되도록 하였고, 유동 방향 끝 경계면으로 갈수록 간격이 커지게끔 배치하여 반사파의 생성을 방지하였다. 또한 핀에 의한 선미 유동 및 반류분포의 변화를 확인하기 위해 선미부와 프로펠러 면 근처에도 조밀한 격자를 생성하였다.

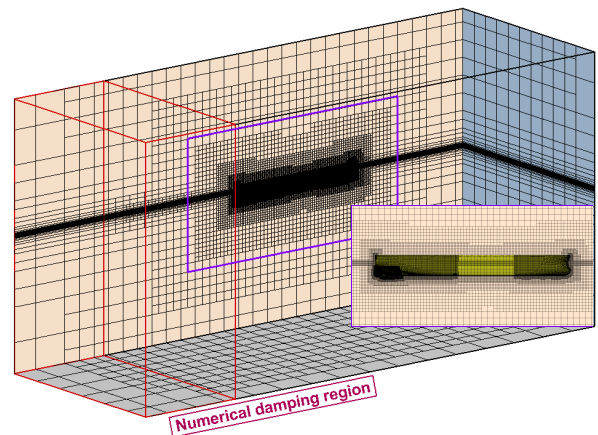
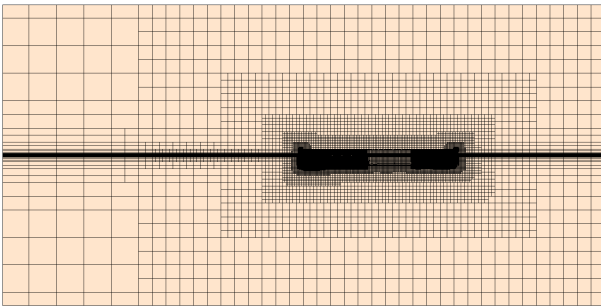


Fig. 5. Grid system used in numerical analysis.

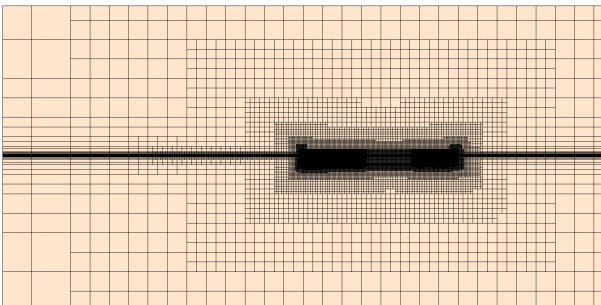
#### 4.5 격자 검증

해석에 앞서 생성된 격자계(grid system)를 ITTC의 권고 (ITTC, 2017)에 따라 검증(verification)하였다. ITTC에서 권고 하는 검증 절차와 지침은 저자의 이전 논문(Lee and Park, 2021)에서 자세하게 설명하고 있다.

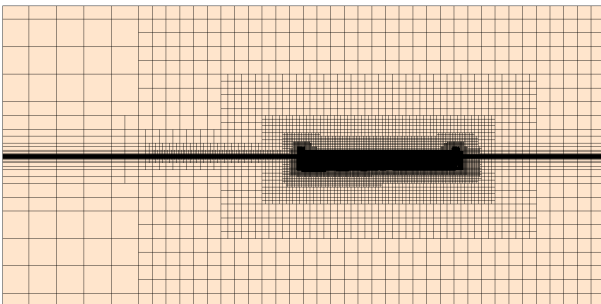
본 연구에서는 검증 대상 격자계와 이를 기준으로 격자 크기(grid size)를  $\sqrt{2}$ 의 개선비(refinement ratio)로 증가 및 감소시킨 총 3개의 격자계에 대해 해석을 수행하였고, 그 격자 계들을 Fig. 6에 도시하였다. 그 후 해석 결과로부터 모형선의 전 저항과 종경사각, 침하량에 대한 수렴성 연구(convergence study)와 수치적 오차(numerical error) 및 불확실성(uncertainty) 평가를 수행하였다.



(a) Coarse grid



(b) Medium grid



(c) Fine grid

Fig. 6. Grid systems used in convergence study.

Table 3. Results of convergence study

Fineness	Cell number	$R_{TM}$ [N]	$\tau_M^*$ [deg.]	$\sigma_M$ (e+3) [m]
Coarse	672,368	32.3	0.111	-6.83
Medium	1,311,609	32.0	0.109	-6.74
Fine	2,705,179	31.8	0.109	-6.69

\*Trim by bow is defined to be positive.

Table 4. Results of numerical error and uncertainty analysis

	$R_{TM}$	$\tau_M$	$\sigma_M$
$r_G$		$\sqrt{2}$	
$\epsilon_{G,21}$	0.190	7.98e-04	-5.25e-05
$\epsilon_{G,32}$	0.317	1.30e-03	-8.75e-05
$R_G$	0.598	0.613	0.600
$\delta_{G,1}^*$	0.190	7.98e-04	-5.25e-05
$U_{G_c}$	0.092	4.65e-04	2.63e-05
$U_{G_c} (\% \hat{S}_{G,1})$	0.29	0.43	0.39

Subscript 'G' means grid size and 'C' means corrected value.

수렴성 연구의 결과를 Table 3, 수치적 오차 및 불확실성 평가의 결과를 Table 4에 도시하였고, 수렴비(convergence ratio,  $R_G$ )가 모두 0과 1 사이였으므로 수치적 오차( $\delta_{G,1}^*$ )와 불확실성( $U_{G_c}$ )은 generalized RE(Richardson Extrapolation) 방법을 사용해 추정하였다. 그 결과 모형선의 전 저항( $R_{TM}$ )과 종경사각( $\tau_M$ ), 침하량( $\sigma_M$ )의 수치적 불확실성이 1% 이하였으므로 medium 격자계를 해석에 사용하였다.

## 5. 결 과

15°C의 담수에서 설계 속도인 14.0 knots( $Fn = 0.153$ ,  $Rn_M = 7.15e+6$ )에 대해 모형선의 정수 중 CFD 해석을 수행하였고, 나선 및 각 영역에 핀이 부착됐을 때의 모형선 전 저항과 이를 압력저항(pressure resistance,  $R_{PM}$ ) 및 전단저항(shear resistance,  $R_{SM})$ 으로 구분하여 Table 5에 도시하였다. 이로부터 실선의 전 저항( $R_{TS}$ )을 예측하기 위해 모형선의 전 저항에 ITTC 1957 방법(Harvald, 1983)을 사용하여 실선 확장하였고, 그 결과를 Table 6에 도시하였다. ITTC 1957 방법은 저자의 이전 논문(Lee and park, 2021)에서 자세하게 설명하고 있고, 이때 마찰저항(frictional resistance) 계수는 Reynolds 수로부터(Todd, 1957), 모형선-실선 상관계수(model-ship correlation allowance)

Table 5. Resistance components of target ship in model-scale

Location	$\alpha_F$ [deg.]	$R_{TM}$ [N]	$R_{PM}$ [N]	$R_{SM}$ [N]
Bare hull		31.975	5.829	26.146
Zone I	10	31.820	5.638	26.182
	10	31.767	5.601	26.166
Zone II	11	31.760	5.585	26.175
	12	31.763	5.575	26.188
Zone III	10	31.721	5.576	26.145
	11	31.691	5.538	26.153
	12	31.655	5.495	26.160
	13	31.655	5.484	26.171
	14	31.661	5.478	26.183
Zone IV	10	31.684	5.545	26.139
	11	31.647	5.503	26.144
	12	31.622	5.473	26.149
	13	31.590	5.432	26.158
	14	31.585	5.413	26.172
	15	31.589	5.401	26.188

Table 6. Resistance performance and running attitude of target ship in full-scale

Location	$\alpha_F$ [deg.]	$R_{TS}$ [kN]	$\tau^*$ [deg.]	$\sigma_S$ [m]	RR%
Bare hull		757.93	0.109	-0.230	
Zone I	10	751.50	0.109	-0.229	-0.85
	10	749.32	0.110	-0.229	-1.14
Zone II	11	749.05	0.110	-0.229	-1.17
	12	749.15	0.109	-0.229	-1.16
Zone III	10	747.44	0.109	-0.229	-1.38
	11	746.23	0.110	-0.229	-1.54
	12	744.71	0.110	-0.229	-1.74
	13	744.71	0.109	-0.229	-1.74
	14	744.95	0.109	-0.229	-1.71
Zone IV	10	745.92	0.109	-0.228	-1.59
	11	744.39	0.110	-0.229	-1.79
	12	743.39	0.109	-0.229	-1.92
	13	742.07	0.110	-0.229	-2.09
	14	741.86	0.110	-0.230	-2.12
	15	742.04	0.110	-0.229	-2.10

\*Trim by bow is defined to be positive.

는 실선의 배수량(displacement)으로부터(Harvald, 1983), 공기저항(air resistance) 계수는 실선의 수선 상부 횡단면적(transverse area above waterline)으로부터 결정되었다(ITTC, 1999). Table 6에서 종경사각( $\tau$ )은 축척(scale)이 달라도 동일하므로 모형선과 실선의 값이 같고, 실선의 침하량( $\sigma_S$ )은 모형선의 침하량과 축척비(scale ratio)의 곱이다. 또한 편이 부착됐을 때 나선 대비 실선의 전 저항 저감률(Reduction ratio, RR%)을 다음과 같이 정의하였다.

$$RR\% = \frac{R_{with\ fin} - R_{w/o\ fin}}{R_{w/o\ fin}} \times 100 \quad (12)$$

식(12)에서  $R$ 은 실선의 전 저항이다.

본 연구의 목표는 저항 저감률이 최대가 되는 편이 부착 위치와 각도를 찾는 것이었는데, 먼저 모든 영역에서 편이 각도가 10° 일 때의 해석을 수행한 결과 Zone I의 저항 저감률만이 1% 이하였으므로 Zone I에서의 편이 각도에 대한 추가 연구는 수행하지 않았다. 나머지 영역에서는 편이 각도를 10° 부터 1° 간격으로 증가시켜가며 각 영역에서 저항 저감률이 가장 큰 각도를 찾았고, Zone II에서는 11°, Zone III에서는 13°, Zone IV에서는 14°의 각도로 부착됐을 때 저항 저감률이 각각 1.17%, 1.74%, 2.12%로 최대가 되었다. 이때 편이 부착 위치와 각도에 따른 종경사각 및 침하량의 변화는 거의 없었다.

각 영역에서 저항 저감률이 최대가 되는 각도로 편이 부착된 선체와 나선의 프로펠러 면 반류분포 및 공칭반류를 Fig. 7에 도시하였다. 나선을 좌측, 편이 부착된 선체를 우측에 도시하였고, 이때 y, z-방향 거리는 프로펠러의 반지름( $R_p$ ), x, y, z-방향 유속은 선속으로 나누어 무차원화하였다.

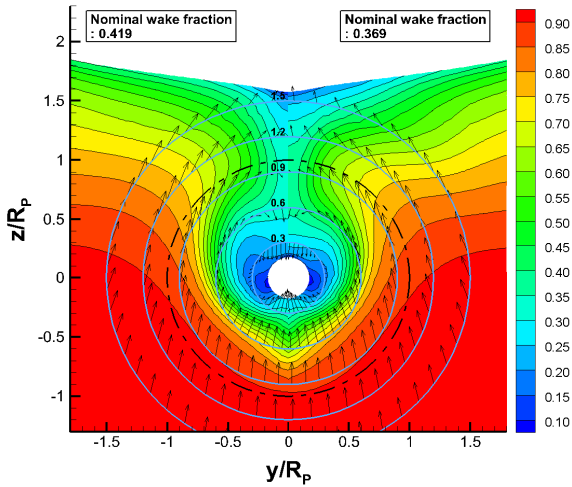
Zone IV에 14°의 각도로 편이 부착된 선체와 나선의 선체 압력분포(pressure distribution) 및 유선을 Fig. 8에 도시하였다. 나선의 등압력선을 점선, 편이 부착된 선체의 등압력선을 실선으로 도시하였고, 유선 중 화살표의 간격이 넓은 것은 나선, 간격이 좁은 것은 편이 부착된 선체의 유선이다. 이때 선체의 압력을 다음과 같이 압력 계수로 무차원화하였다.

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho V^2} \quad (13)$$

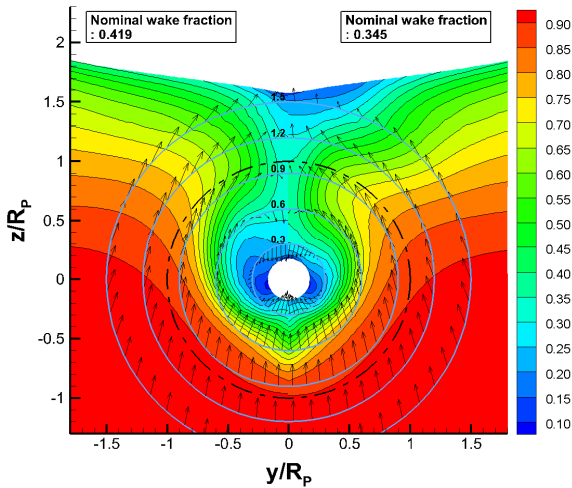
식(13)에서  $p$ 는 선체의 압력,  $p_0$ 는 정수압,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V$ 는 선속이다.

유선 중 화살표의 간격이 넓은 것은 나선의 유선이고, 간격이 좁은 것은 편이 부착된 선체의 유선이다.

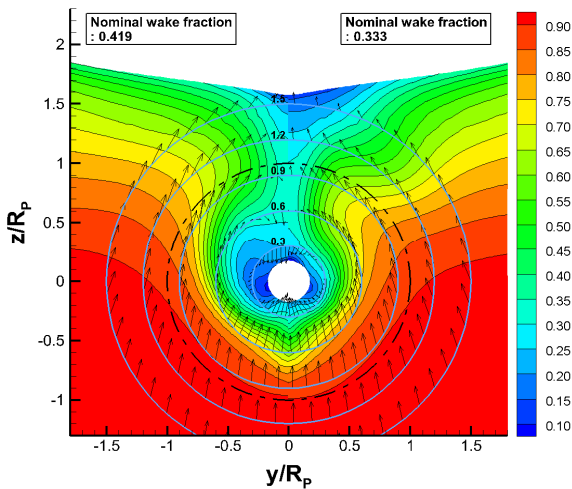




(a) Zone II ( $\alpha_F = 11^\circ$ )



(b) Zone III ( $\alpha_F = 13^\circ$ )



(c) Zone IV ( $\alpha_F = 14^\circ$ )

Fig. 7. Comparison of wake distribution and nominal wake fraction on propeller plane with fin and without fin (Left: Hull without fin, Right: Hull with fin)

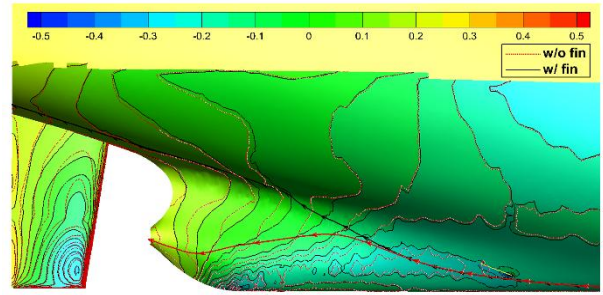


Fig. 8. Comparison of pressure distribution and streamline on stern hull with fin and without fin.

Fig. 8과 같이 나선에서는 선저(base line)로부터 선체의 측면으로 흐르는 빌지 볼텍스(bilge vortex)가 프로펠러로 유입되었지만, 선미부에 핀이 양의 각도로 부착되면 이 볼텍스는 핀에 의해 프로펠러로 유입되지 않고 선미를 따라 위쪽으로 흐르게 되었다. 이로 인해 Fig. 7과 같이 프로펠러 상부 ( $z/R_p > 1.0$ )의 유속이 감소되어 이 영역의 압력이 증가하였고, 이는 선체를 전방으로 미는 힘으로 작용해 선체의 압력 저항이 감소하였다. 또한 Fig. 8에서 핀이 부착되면 선미부 압력이 높아지는 것을 볼 수 있는데, 이로부터도 선체를 전방으로 미는 힘이 작용한다는 것을 알 수 있다. 물론 돌출된 핀이 그 주위 압력을 낮추기는 하였으나, 그 면적은 압력이 증가된 선미부의 면적에 비해 미소하여 결과적으로 총 압력 저항은 감소하였다. 이러한 결과는 Table 5에서 핀이 부착된 모형선의 압력저항이 나선에 비해 감소한 것으로부터 알 수 있고, 전단저항은 대체적으로 미소하게 증가하였다.

## 6. 결론

현존선인 80k Bulk carrier의 EEXI 규정 만족과 CII 등급 상승을 위해 ESD를 활용하여 저항성능을 개선시키고자 하였고, 그 과정 중 본 연구에서는 프로펠러로 유입되는 유동을 제어해 저항성능을 높이고자 선미부에 직사각형 단면의 핀을 부착하였다. 핀의 길이, 폭, 높이는 고정시킨 채 부착 위치와 유선에 대한 각도를 변화시켰고, 이에 따른 저항성능과 반류의 변화를 모형선에 대한 CFD 해석을 통해 분석하였다. 이로부터 실선의 저항성능은 IITC 1957 방법을 사용해 예측하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 선저를 기준으로 유선보다 큰 각도로 선미부에 부착된 핀은 프로펠러로 유입될 빌지 볼텍스의 경로를 위쪽으로 변경시켜 선미를 따라 트랜섬(transom)으로 흐르게 하였고, 이는 프로펠러 날개 상단과 선미 사이의 유속을 감소시켰다.



- 핀의 부착으로 프로펠러 상부의 유속이 감소됨에 따라 이 영역의 압력이 증가하였고, 이는 선체를 전방으로 미는 힘으로 작용해 선체의 압력저항이 감소하였다.
- 핀이 부착되면 근처 미소 면적의 압력이 감소하고 전단 저항이 미미하게 증가하였으나, 핀이 부착된 선체는 나선에 비해 선미부 전반에 걸쳐 압력이 증가해 결과적으로 선체의 압력저항과 전 저항이 감소하였다.
- 핀의 부착 위치가 길이 방향으로서는 선미, 홀수 방향으로서는 선저에 가까울수록 저항 저감률이 높았고, 각 위치에서 유선에 대한 핀의 각도가 증가할수록 저항 저감률도 높아지다가 특정 각도에서 최대를 보였다.
- 핀의 부착에 의한 전 저항의 감소는 반류의 변화와 연관이 있으므로, 부착 위치에 따른 차이는 있지만 대체적으로 저항 저감률이 클수록 공칭반류의 감소량도 커졌다.
- 핀이 부착된 선체의 종경사각과 침하량은 나선과 큰 차이가 없었으므로, 선미부에 핀이 부착되어도 선체의 운동에 주는 영향은 거의 없었다.

본 연구에서는 대상 선박의 선미부에 단일 핀을 부착하여 설계 속도에서의 전 저항을 약 2.1% 저감시켰는데, 추후에는 설계 속도뿐만 아니라 실운항 선속을 포함하여 다양한 선속에서의 연구를 수행할 필요가 있다. 또한 이는 수치해석을 통해 얻어진 결과이므로 적용에 앞서 예인 수조 모형 시험을 통한 검증(validation)이 수반되어야 한다.

선미부에 단일 핀을 부착하는 기존 연구들의 대다수가 핀의 부착 각도 기준을 선저 또는 홀수로 정의하였는데, 선형(hull form)에 따라 동일한 위치에서의 유선이 다르기 때문에 유선과의 상대 각도를 알 수 없다. 이에 본 연구에서는 핀 부착 각도의 기준을 각 위치에서의 유선으로 정의하여 유선과의 상대 각도에 따른 상관관계를 알 수 있으므로, 단일 혹은 다수의 핀을 부착하거나 핀을 포함한 여러 ESD를 조합하는 연구에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다. 단, 현존선에 적용 시 신규 프로펠러를 설계하지 않고 기존의 프로펠러를 그대로 유지한다면, 반류의 변화를 고려하여 자항(self-propulsion) 성능을 검토한 후 적절한 조건의 핀을 선택해야 한다.

## 후 기

이 연구는 부산광역시의 대학혁신연구단지조성사업 중 ‘동명대학교 대학혁신연구단지조성사업’의 지원을 받아 수행되었습니다(IURP2101).

## References

- [1] CD-adapco(2018), STAR-CCM+ User Guide, Ver. 13.02.
- [2] 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.
- [3] Ferziger, J. H. and M. Perić(2002), Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Edition, Springer, Germany, pp. 292-294.
- [4] Gibson, M. M. and B. E. Launder(1978), Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 86, No. 3, pp. 491-511.
- [5] Harvald, S. A.(1983), Resistance and Propulsion of Ships, John Wiley & Sons, USA, pp. 98-100.
- [6] 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.
- [7] International Towing Tank Conference(ITTC)(2011), Fresh Water and Seawater Properties, Recommended Procedures, 7.5-02-01-03, pp. 3-9.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Kim, D. J., W. J. Oh, J. W. Park, and S. M. Jeong(2016), A Study on Flow Characteristics due to Dimension Variations of the Vertical Plate for Controlling the Ship Stern Flow, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 22, No. 5, pp. 576-582.
- [11] 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.
- [12] Lien, F. S. and M. A. Leschziner(1994), Assessment of Turbulence-Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure for Flow over a Backward-Facing Step, Computers & Fluids, Vol. 23, No. 8, pp. 983-1004.

- [13] Park, D. W., H. J. Choi, H. S. Yoon, and H. H. Chun(2009), A Numerical Study for Improvement of the Speed-Performance of a Ship with Flow Control Flat Plate, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 3, pp. 268-278.
- [14] Ram, B. R. R., S. Surendran, and S. K. Lee(2015), Computer and Experimental Simulations on the Fin Effect on Ship Resistance, Ships and Offshore Structures, Vol. 10, No. 2, pp. 122-131.
- [15] Rodi, W.(1991), Experience with Two-Layer Models Combining the k- $\epsilon$  Model with a One-Equation Model Near the Wall, 29th Aerospace Sciences Meeting, Reno, January 1991, AIAA 91-0216.
- [16] 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.
- [17] Samsung Heavy Industry(2007), Flow control appendages for improvement of pressure resistance and hull vibration, Korean patent, 1007189340000 B1.
- [18] Todd, F. H.(1957), Skin Friction and Turbulence Stimulation, Proceedings of the 8th ITTC Conference, Madrid, September 1957, pp. 71-227.
- [19] Wie, D. E. and D. J. Kim(2012), The Design Optimization of a Flow Control Fin Using CFD, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 49, No. 2, pp. 174-181.

---

Received : 2021. 12. 01.

Revised : 2021. 12. 20.

Accepted : 2021. 12. 28.