

선체 주위 파에 대한 고정도 모사가 선체 저항에 미치는 영향

강민재¹·오석환²·김찬우¹·윤미진¹·이상봉^{1,†}
동아대학교 조선해양플랜트공학과¹
부산대학교 조선해양공학과²

An Effect of Numerical Region with High Resolution for Kelvin Wave on Ship Resistance

Min Jae Kang¹·Seok Hwan Oh²·Chan Woo Kim¹·Mi Jin Yoon¹·Sang Bong Lee^{1,†}
Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University²

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.

Reynolds-averaged Navier-Stokes simulations have been performed to investigate an effect of numerical region with high resolution for Kelvin wave around KRISO container ship on its resistance. In the present study, 13 millions cells were used to describe wave profile along the ship hull and Kelvin wave patterns. In order to control a size of numerical region with high resolution for waves around the hull, we employed relaxation zones from a side boundary of numerical domain in which Kelvin wave was suppressed. When the far-field Kelvin wave was not precisely resolved due to the relaxation zone, the instantaneous history of ship resistance was affected although the time average of ship resistance showed $-1.15\sim-2.1\%$ errors. Especially, the damping characteristics of ship resistance in time history was significant when using a large relaxation zone in the side boundary.

Keywords : Kelvin wave(켈빈파), Ship resistance(선체 저항), Relaxation zone(감쇄 영역), OpenFOAM(오픈폼)

1. 서론

최근 조선 및 해양 산업에서 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 전산유체역학을 이용하여 선체 저항에 대한 수치 해석을 진행하기 위해 선체 주위에 공간 격자를 생성해야 한다. 기존 연구에서는 격자의 일관성을 유지하기 위해 정렬 격자를 이용하였으나 선박은 선수, 선미의 형상이 복잡하여 정렬 격자를 이용한 격자 생성 시 많은 노력이 필요하다 (Kim et al., 2005; Choi et al., 2009). 따라서 격자 생성의 편의성을 위해 STAR-CCM+와 같은 비정렬 격자를 이용한 선체 저항에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 대표적으로 Jun et al. (2011)은 선박의 저항, 자항 성능을 예측하기 위해 선수, 선미 및 자유 수면에 격자가 밀집된 형태인 비정렬 격자를 사용하였다. 이와

유사한 격자 형태를 이용하여 Park et al. (2013a)은 선박의 배수량, 트림 자세별 저항 성능을 분석하였으며, Lee & Lee (2014)는 KCS를 포함한 총 33척 264케이스에 해당하는 선체 저항을 해석함으로써 비정렬 격자를 이용한 저항 해석 시 격자의 통계적 신뢰도를 평가하였다. 이러한 신뢰도를 바탕으로 Kim & Lee (2017)는 단파장 영역에서 운항 자세 조건에 따른 선박의 저항 성능을 추정하였다. 기존의 연구결과에서 사용한 비정렬 격자를 살펴보면 자유 수면의 격자 밀집을 중요하게 고려하였으며, Afshar (2010)은 OpenFOAM에서 자유 수면에 대한 격자 크기 및 수치 기법이 파고에 미치는 영향을 분석하였다. 선체 주위파의 고정도 모사를 위해 비정렬 격자를 이용한 자유 수면의 격자 밀집, 격자 크기뿐만 아니라 계산 영역의 측면 경계에 감쇄 영역을 설정한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Peric & Abdel-Maskoud (2016)은 파형의 고정도 모사를 위해 감쇄 기법에 대한 검증과 측면 경계에 감쇄 영역을 설정하여

선체 저항을 분석하였으며, Kim et al. (2017)은 측면 경계에 감쇄 영역을 설정하여 해상 조건에서 추가 저항 및 해상 응답에 대한 분석을 진행하였다. 이와 유사한 격자를 이용하여 Luo et al. (2016)은 설계 조건과 평형수 조건에서 점성 유동장 및 트림에 관한 연구를 진행하였으며, Tezdogan et al. (2016)은 천수에서 선박의 운동에 대한 수치 해석을 진행하였다. 이상의 연구 결과를 살펴볼 때 자유 수면의 격자 구성에 대한 연구와 측면 경계에 감쇄 영역을 설정하여 선체 저항의 평균값에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 하지만 선체 주위파의 고정도 모사에 따른 전 저항 계수 시계열에 대한 정량적인 연구는 체계적으로 이루어지지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 선체 주위 파의 정도 높은 모사가 전 저항 계수 시계열에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 자유 수면 근처에 격자를 밀집시키기 위해 STAR-CCM+를 이용하여 격자를 생성하였으며, 격자 수는 1,300만개이다. 수치 해석에 사용한 격자는 많은 해석 시간을 요구하지만 선체 주위에서 발생하는 파형의 정도 높은 모사를 위해 선행 연구보다 많은 수의 격자를 사용하였다. 이러한 격자에 대해 측면 경계에 감쇄 영역을 설정하여 격자의 변형 없이 선체 주위 파의 모사 영역을 변경함으로써 선체 주위 파의 모사 영역이 선체 저항에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또 선체 저항의 평균값뿐만 아니라 실시간 시계열의 거동을 분석할 것이다. 본 연구에서는 공개 소스 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 비정렬 격자에서 선체 저항 해석을 수행하였다. 정수 중 선체 저항 해석은 자유 수면을 고려한 다상 유동 해석자를 이용하였다.

2. 수치 기법 및 검증

2.1 지배 방정식

자유 수면을 고려한 비압축성 유동장 해석을 위해 아래와 같이 질량 및 운동량 보존 방정식을 사용하였다. 다상 유동을 해석하기 위해 유체 체적법(Volume of Fluid, VOF)을 적용하였다.

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot T + \rho g \tag{3}$$

여기서 U는 각 방향의 속도 벡터이며, α는 격자에서 물이 차지하는 체적을 나타낸다. 편향 점성 응력인 T는 아래의 식으로 계산된다.

$$T = 2\mu_{eff}S - 2\mu_{eff}(\nabla \cdot U)I/3 \tag{4}$$

S는 평균 변형을 텐서이며, μ_{eff}는 유효 점성으로 유체의 동점성(μ)과 난류 모델에 의한 난류 점성(μ_t)의 합에 해당한다. 난류 점성을

계산하기 위해 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식에 기반한 k-ω SST 난류 모델을 사용하였다. 최근 현업에서 저항 해석뿐만 아니라 저항 해석을 염두에 두고, 프로펠러의 성능 해석에 효과적인 k-ω SST 난류 모델을 저항 해석에도 사용하는 경우가 많다. 본 연구에서도 현업에서의 이러한 요구 사항을 반영하여 저항 해석에서 k-ω SST 난류 모델을 사용하였다. 효율적인 격자 구성을 위해 벽면 근처에서 벽함수를 사용하였는데, 본 수치 해석에서 사용한 OpenFOAM 라이브러리의 경우 매우 다양한 벽함수를 제공한다. 이 중에서 Pope (2000)가 제시한 난류 에너지 생성 모델을 기반으로 하는 nutkWallFunction에서 난류 에너지의 생성 부분을 Launder & Spalding (1972)이 제시한 모델로 치환하여 사용하였다. 이러한 모델 방정식에 대한 설명 및 효과는 기존 연구에서 충분히 논의된 바 있다 (Park et al., 2013b).

본 연구에서는 PISO(Pressure Implicit with Split Operator)와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘에 기반한 interFoam을 사용하였다. 시간에 대해 1차 정확도의 Euler 차분 기법을 적용하였다. 공간 차분의 경우 해의 정확도와 수치적 안정성을 확보하기 위해 2차 정확도의 선형(linear) 차분과 1차 정확도의 풍상(upwind) 차분의 조합인 Gamma 기법을 사용하였다. Gamma 수치 기법 및 조합도(degree of blending)가 수치 해에 미치는 영향에 대한 기존 연구 (Jones, 2015)를 바탕으로 0.5의 조합도를 선정하였다.

2.2 계산 영역 및 해석 조건

본 연구의 대상선은 KCS이며, 실선과 모형선의 주요 치수는 Table 1과 같다. 상기 지배 방정식을 이용하여 설계 속도(24knots)로 운항 시 선체 주위 유동에 대한 수치 해석을 수행하였고, 이를 위해 Fig. 1과 같이 계산 영역을 설정하였다. 선체 중심과 자유 수면이 만나는 곳을 좌표축의 원점으로 하며, 원점에서 선수 방향을 -x, 선미 방향을 +x, 우현 방향을 +y, 중력 가속도의 반대 방향을 +z로 정한다. 계산 영역에 따른 선체 주위 파의 모사 정도를 확인하기 위해 Fig. 1의 (a)와 (b)로 계산 영역을 다르게 설정하였다. 그림 (a)는 계산 영역의 크기에 대해 선박의 길이 방향으로 5.8L_{pp}, 폭 방향으로 2.5L_{pp}, 깊이 방향으로 2.5L_{pp}를 각각 설정하였다. 그림 (b)는 계산 영역의 크기에 대해 각 방향으로 4.4L_{pp}, 1.7L_{pp}, 2.5L_{pp}로 설정하였다. 모든 경우에 대해 선수에서 발생할 수 있는 반사파에 의한 교란을 제거하기 위해 입구 경계에 감쇄 영역을 설정하였고, 출구 경계에서 발생할 수 있는 반사파를 제거하기 위해 출구 경계에도 감쇄 영역을 설정하였다. 감쇄 영역에 대한 검증은 2.4에서 다룰 것이다. 각 계산 영역에 적용된 격자 밀집(grid refinement) 영역에서 격자의 크기는 모두 동일하고, Δz/L_{pp}=6.44 x 10⁻⁴이다. 각 계산 영역에 대해 트리머 격자(trimmer mesh)와 프리즘 격자(prism layer)를 사용하였다. 선체 주변에 총 6개의 프리즘 격자를 사용하였고, 첫 번째 벽면 격자 간격은 선체 전체의 y⁺ 평균값이 60~70이 되도록 프리즘 격자를 설정하였다. 측면 경계 또한 모든 계산 영역에 대해 대칭 경계 조건을 적용하였다.

Table 1 Main particulars of KCS

Particulars	Full scale	Model scale
Scale	1	31.6
Length between perpendiculars (m)	230.0	7.2786
Length of waterline (m)	232.5	7.3577
Depth (m)	19.0	0.6013
Draft (m)	10.8	0.3418
Displacement volume (m ³)	52.030	1.6490
Wetted surface area without rudder (m ²)	9424	9.4379

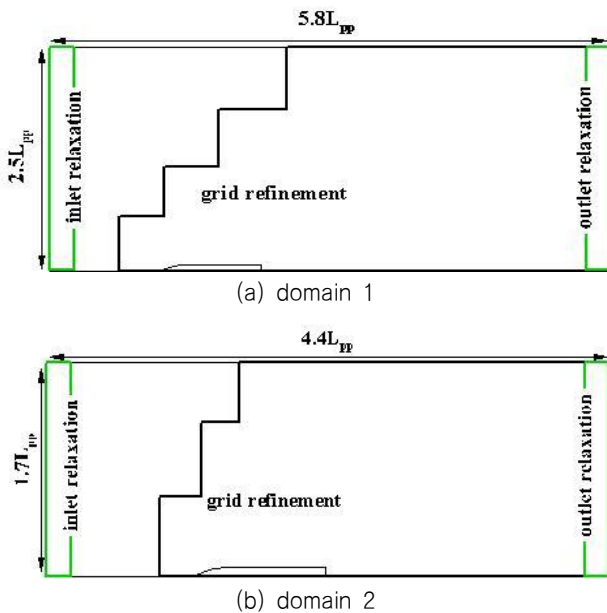


Fig. 1 Top view of numerical domains

그림 (a), (b)에서 격자수는 각각 2,300만, 1,300만개이다. 일반적으로 현업에서 선체 저항을 해석하기 위해 주로 사용되는 계산 영역의 격자 수는 100만 ~ 200만 개 수준이지만 (Lee & Lee, 2014), 본 연구에서는 선체 주위 파형의 고정도 모사를 위해 1,300만, 2,300만개의 격자 수를 이용 하였다. 상기 계산 영역 및 해석 조건으로 $t_{VM}/L_{pp}=0$ 에서 $t_{VM}/L_{pp}=10$ 까지 수치 해석을 수행하였으며 시간 간격은 $\Delta t_{VM}/L_{pp} = 3.0 \times 10^{-4}$ 이다.

2.3 수치 해석 결과 검증

Fig. 2는 Fig. 1에서 정의한 각 계산 영역에서 선체에 의해 발생하는 파형인 켈빈 파 및 선미파를 나타낸 그림이다. Fig. 2(a)와 (b)를 비교해 볼 때 계산 영역의 크기가 선체 주위 파의 모사 정도에 미치는 영향을 알 수 있다. Fig. 2(a)와 (b)를 보면 선체 주위 파가 잘 모사되었으나, 계산 영역의 측면 경계에 일부 파형이 보인다. 이는 선체에 의해 발생하는 파형이 정상 상태로 수렴 중에 발생한 파형이며, 시간이 지남에 따라 지속적

로 감소한다. 결국 Fig. 2(a)와 (b)는 계산 영역의 크기는 다르지만 정성적인 관점에서 볼 때 선체 주위 파가 비슷하게 모사되었다. 이는 해석 시간을 고려할 때 그림 (b)에서 사용한 계산 영역의 크기가 더 효율적임을 의미한다.

보다 정량적인 평가를 위해 각 계산 영역에서 선측 파형과 $y/L_{pp}=0.0741$ 에서 파형을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)를 보면 각 계산 영역에서 선측 파형은 Van et al. (2000)에서 보고된 실험 결과와 잘 일치하며, Fig. 3(b)를 보면 각 계산 영역에서 얻어진 $y/L_{pp}=0.0741$ 에서의 파형은 Kim et al. (2001)에서 보고된 실험 결과와 잘 일치한다. 계산 영역의 크기에 무관하게 선측 파형 및 $y/L_{pp}=0.0741$ 에서 파형이 정성적, 정량적으로 비슷하게 모사되었다.

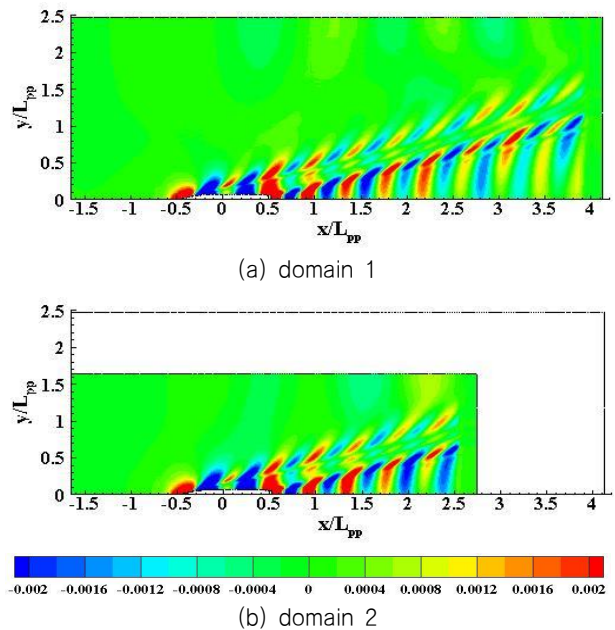
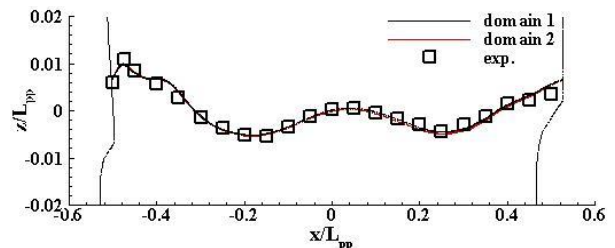
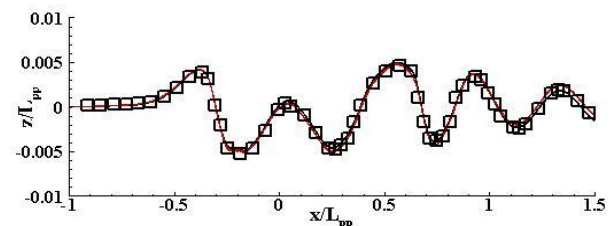


Fig. 2 Wave patterns around KCS hull



(a) wave profile along a ship hull



(b) wave profile at $y/L_{pp} = 0.0741$

Fig. 3 Wave profiles along a ship hull and $y/L_{pp} = 0.0741$

Table 2 Total resistance coefficients for domains 1 & 2

	exp.	domain 1	domain 2
$C_T \times 10^3$	3.557	3.532	3.516
error(%)		- 0.7	- 1.15

Fig. 1에서 정의한 계산 영역의 타당성을 검증하기 위해 각 계산 영역별 전 저항 계수(C_T)와 오차를 계산하여 Table 2에 명기하였다. 모든 경우에서 전 저항 계수는 Van et al. (1998)에서 보고된 3.557×10^{-3} 과 잘 일치하며, 실험값과 오차는 -1.15%, -0.7%이다. 따라서 계산 영역의 크기가 전 저항 계수에는 큰 영향을 주지 않는다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1(b)의 계산 영역을 채택하였다.

2.4 감쇄 기법 검증

본 연구에서는 OpenFOAM 라이브러리 중 waves2foam에서 제공하는 감쇄 기법을 사용하였다 (Jacobsen et al., 2012).

$$\Phi = \alpha_R \Phi_{computed} + (1 - \alpha_R) \Phi_{target} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\Phi_{computed}$ 는 계산 값이며, Φ_{target} 은 이론값이고 α_R 은 가중 함수이다. 감쇄 영역 내에서 가중 함수를 이용하여 속도나 VOF를 $\Phi_{computed}$ 와 Φ_{target} 사이에 분포하도록 한다. 가중 함수는 지수 가중 함수, 3차 다항식 가중 함수 등이 있다. 식 (6)은 지수 가중 함수이며, 식 (7)은 3차 다항식 가중 함수이다.

$$\alpha_R(\chi_R) = 1 - \frac{\exp(\chi_R^{3.5} - 1)}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \chi_R \in [0;1] \quad (6)$$

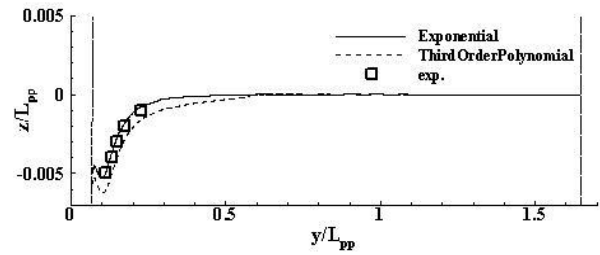
$$\alpha_R(\chi_R) = -2(1 - \chi_R)^3 + 3(1 - \chi_R)^2 \quad \text{for } \chi_R \in [0;1] \quad (7)$$

여기서 χ_R 은 감쇄 영역이 시작되는 지점과 끝나는 지점에서 0 또는 1을 갖도록 설정된 변수이다. 따라서 α_R 은 χ_R 에 따라 0과 1사이의 값을 가지는 함수이다. 이처럼 $\alpha_R(\chi_R)$ 은 연속 함수이며, 모든 χ_R 의 범위에서 단조 함수이다. 감쇄 영역의 강도를 분석하기 위해 감쇄 강도(Relaxation Strength, RS)를 식 (8)로 정의하였다.

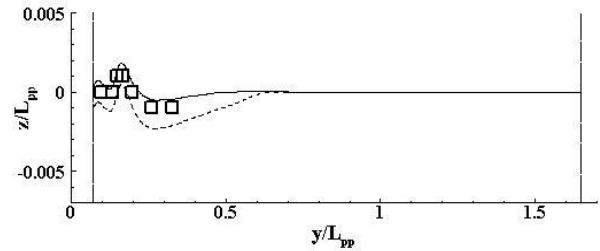
$$RS = \int_0^1 \alpha_R(\chi_R) d\chi_R \quad (8)$$

식 (8)에서 RS = 1이라면, 감쇄 영역에서 $\Phi_{computed}$ 100%와 Φ_{target} 0%가 반영되며, RS = 0인 경우는 $\Phi_{computed}$ 0%와 Φ_{target} 100%가 반영된다. 가중 함수 식 (6)과 (7)의 RS는 각각 0.824, 0.5이다.

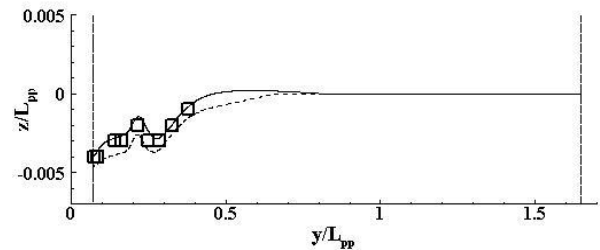
RS에 따른 감쇄 기법을 평가하기 위해 Fig. 1(b)의 계산 영역의 측면 경계에서부터 $y/L_{pp} = 0.55$ 까지 감쇄 영역을 설정하였으며, 식 (6)과 식 (7)의 가중 함수를 각각 적용하여 수치 해



(a) wave profile at $x/L_{pp} = -0.2$



(b) wave profile at $x/L_{pp} = 0$



(c) wave profile at $x/L_{pp} = 0.3$

Fig. 4 Wave profiles for each relaxation weight

석을 진행하였다. Fig. 4는 감쇄 영역의 가중 함수가 서로 다른 해석 결과로부터 선측 파형의 마루와 골의 위치인 $x/L_{pp} = -0.2, 0, 0.3$ 에서 파형을 나타내었다. Fig. 4를 보면 모든 x/L_{pp} 에서 지수 가중 함수가 적용된 수치 해석이 Kim et al. (2001)에서 보고된 실험값과 정성적, 정량적으로 더 잘 일치하며, 3차 다항식 가중 함수의 경우 실험값과 정량적으로 차이가 발생한다. 특히 Fig. 4(b)를 보면 3차 다항식 가중 함수가 적용된 수치 해석은 실험값, 지수 가중 함수와 큰 오차가 발생한다. 이는 RS에 의한 반사파에서 기인한 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 가중 함수에 의한 수치 오류를 제거하기 위해 감쇄 영역을 적용한 모든 수치 해석에 RS=0.824를 가지는 지수 가중 함수를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 목적은 선체 주위 파의 모사가 선체 저항 시계열에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 2.2에서 선체 주위 파형을 모사하기 위해 2개의 계산 영역을 설정하였다. 각 경우에서 선체 주위 파의 모사에 대한 정량적, 정성적 평가를 진행하였으며, 2.4에서 가중 함수에 따른 감쇄 기법에 대한 평가를 진행하였다. 최종적으로 선체 주위 파의 효율적인 고정도 모사를 위해 Fig. 1(b)의 계산 영역을 채택하였으며, 감쇄 영역

에서 가중 함수에 의한 수치 오류를 제거하기 위해 지수 가중 함수를 채택하였다. 일반적으로 선체 주위파의 정밀한 모사를 위한 방법으로는 계산 영역의 크기 변경, 격자 밀집 영역의 범위 변경, 측면 경계에 감쇄 영역 설정 등이 있다. 계산 영역의 크기 변경은 경계 조건에 의한 유동장의 왜곡에 따라 선체 저항이 달라질 수 있으며, 비정렬 격자의 특성상 선체 주위 격자가 달라질 수 있다. 격자 수와 격자 밀집 영역의 변경은 경계 조건에 의한 선체 저항의 왜곡은 없으나 격자 수와 격자 밀집 영역이 달라짐에 따라 선체 주위 격자가 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 경계 조건에 의한 유동장의 왜곡과 선체 주위 격자의 불확실성을 제거하기 위해 Fig. 1(b)의 계산 영역을 그대로 유지하면서 측면 경계에 감쇄(Side Relaxation, SR) 영역을 설정함으로써 선체 주위의 파형이 모사되는 영역(Wave Region, WR)을 변경시켰다.

Fig. 5는 Fig. 1(b)의 계산 영역에 대해 측면 경계에 다양한 감쇄 영역의 설정을 도식화 한 그림이다. Fig. 5에서 WR 1.70은 선체 중심으로부터 $y/L_{pp}=1.70$ 까지 선체 주위 파형을 모사하기 위해 측면 경계에 감쇄 영역을 적용하지 않은 것이다. WR 1.10은 선체의 중심으로부터 $y/L_{pp}=1.10$ 까지 선체 주위 파형을 모사하기 위해 SR을 측면 경계에서부터 $y/L_{pp}=1.10$ 까지 설정한 것이며, WR 0.55는 선체의 중심으로부터 $y/L_{pp}=0.55$ 까지 선체 주위 파형을 모사하기 위해 SR을 측면 경계에서부터 $y/L_{pp}=0.55$ 까지 설정한 것이다. 위와 같은 방법으로 WR 1.70, WR 1.10, WR 0.55, WR 0.27, WR 0.14, WR 0.07을 설정하여 6개의 경우에 대해 수치 해석을 진행하였다.

Table 3은 WR의 범위가 서로 다른 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수이다. Van et al. (1998)에서 보고된 3.557×10^{-3} 와 각 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수의 오차는 $-1.15\% \sim +2.1\%$ 임을 확인하였다. 이로부터 선체 주위 파의 모사가 전 저항 계수에 다소 영향을 미치며, 전 저항 계수의 특성이 달라짐을 확인할 수 있다. 선체 주위 파에 대한 비정상 상태 해석의 경우 파형의 변화에 의해 선체 저항이 주기적으로 진동하면서 정상상태로 수렴해가는 특성을 지닌다. 따라서 선체 주위 파의

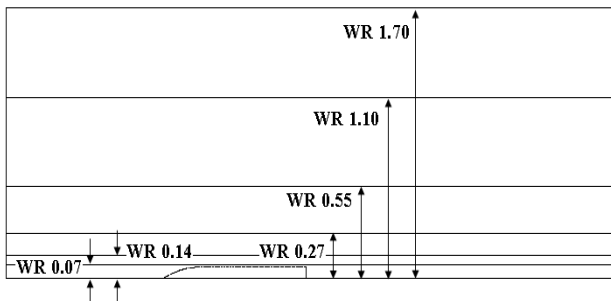


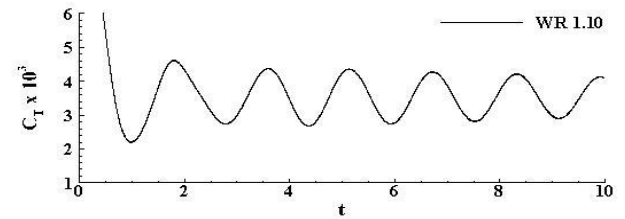
Fig. 5 Size of wave region(WR) in domain 2

Table 3 Total resistance coefficients for various WR

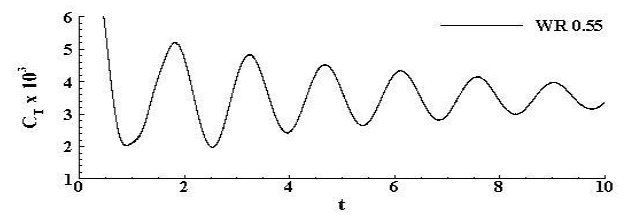
	WR 1.70	WR 1.10	WR 0.55	WR 0.27	WR 0.14	WR 0.07
$C_T \times 10^3$	3.516	3.553	3.549	3.524	3.571	3.631
error(%)	- 1.15	- 0.1	- 0.2	- 0.9	0.4	2.1

고정도 모사가 선체 저항에 미치는 영향을 정밀하게 분석하기 위해서는 실시간 선체 저항의 시계열에 대한 분석이 필요하다.

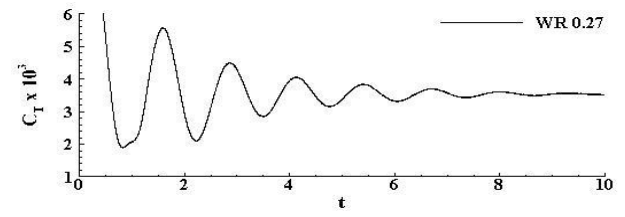
Fig. 6는 측면 경계의 감쇄 영역 범위가 서로 다른 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수의 시계열을 나타낸 그림이다. Fig. 6을 보면 WR의 범위에 따라 전 저항 계수 시계열은 각 계산 영역별 서로



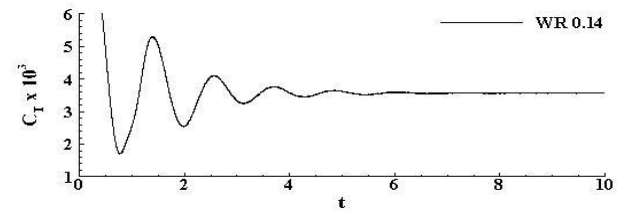
(a) WR 1.10



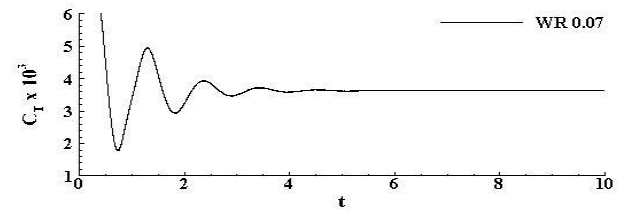
(b) WR 0.55



(c) WR 0.27



(d) WR 0.14



(e) WR 0.07

Fig. 6 Time histories of total resistance coefficients for various WR

상이다. 그림을 보면 WR의 범위가 감소할수록 전 저항 계수 시계열의 진폭이 시간이 지남에 따라 감소하는 감쇠 진동의 그래프 형상을 가진다. 즉 WR의 범위가 감소함에 따라 감쇠력이 더 큰 감쇠 진동의 진폭 그래프처럼 보이므로 선체 주위의 파형에 대한 고정도 모사가 실시간 전 저항 계수의 감쇠 특성에 미치는 영향이 존재함을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 SR이 적용된 계산 영역의 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수의 실시간 시계열을 감쇠 진동의 일반해인 식 (9)로 정의하여 WR의 범위에 따른 전 저항 계수의 시계열($C_T(t)$)을 분석함으로써 감쇠 계수를 도출하고자 하였다.

$$C_T(t) = a \cdot \exp(-bt) \cdot \cos(\omega t + \Phi) + C_T \quad (9)$$

식 (9)에서 a 는 $C_T(t)$ 의 진폭, b 는 감쇠 계수, Φ 는 위상, ω 는 각속력을 의미한다. 보다 직관적인 분석을 위해 전 저항 계수의 시계열을 식 (10)를 이용하여 $\dot{C}_T(t)$ 로 정의하였다.

$$\dot{C}_T(t) = |C_T(t) - C_T| \quad (10)$$

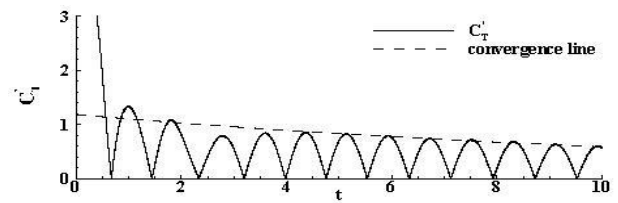
WR의 범위에 따라 $\dot{C}_T(t)$ 의 진폭(a)와 진폭의 감쇠 계수(b)를 정량적으로 구하기 위해 $\dot{C}_T(t)$ 진폭의 최고점을 이은 선을 식 (11)로 모델링이 가능하다. 식 (11)의 근사해를 구하기 위해 근사적으로 구하려는 해와 실제 해의 오차 자승의 합이 최소가 되는 최소자승법을 이용하였다.

$$\text{convergence line} = a \cdot \exp(-bt) \quad (11)$$

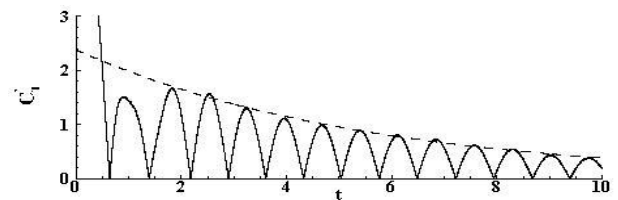
Fig. 7은 WR이 서로 다른 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수에 대해 식 (10)에서 정의한 $\dot{C}_T(t)$ 의 시계열과 식 (11)에서 정의한 $\dot{C}_T(t)$ 진폭의 최고점을 이은 수렴선을 나타낸 그림이다. Fig. 7에서 WR의 범위가 감소함에 따라 수렴선이 정성적으로 더 빠르게 감쇠하는 경향을 가진다. 보다 정량적인 분석을 위해 Table 4에 식 (11)의 a 와 b 의 근사해를 명기하였다. Table 4를 보면 WR의 범위에 따라 전 저항 계수 시계열의 특성이 달라짐을 알 수 있다. $C_T(t)$ 의 진폭을 나타내는 a 는 WR의 범위가 감소함에 따라 증가하는 경향을 가지며 감쇠 계수를 나타내는 b 는 WR의 범위가 감소함에 따라 증가하게 된다. $WR < 0.55$ 인 영역에서 전 저항 계수의 시계열 및 식 (11)의 a 와 b 의 근사해를 보면 전 저항 계수 시계열의 진폭 감소(b)가 큰 것을 볼 수 있으며, 최종적으로 $\dot{C}_T(t)$ 는 0이 된다. 반면 $WR \geq 0.55$ 인 영역을 보면 전 저항 계수 시계열이 초기 일정 시간 이후 비교적 균일한 주기적 진동을 보이며, a 와 b 의 근사해는 $WR < 0.55$ 인 영역에 비해 작은 값을 가진다.

Table 4 Coefficients of \dot{C}_T convergence line

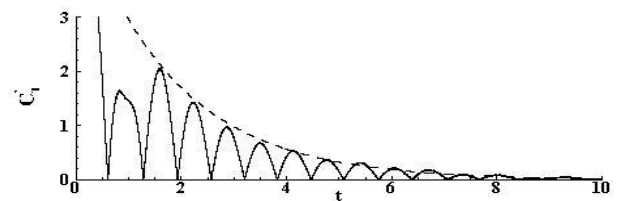
	WR 1.10	WR 0.55	WR 0.27	WR 0.14	WR 0.07
a	1.18	2.38	5.12	5.63	5.21
b	0.07	0.183	0.552	0.889	1.172



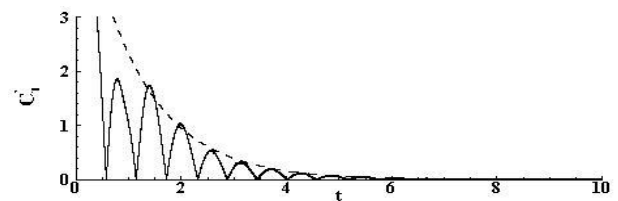
(a) WR 1.10



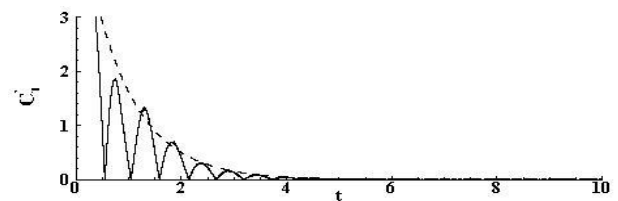
(b) WR 0.55



(c) WR 0.27



(d) WR 0.14



(e) WR 0.07

Fig. 7 Time histories of $\dot{C}_T(t)$ and its convergence lines for various WR

SR의 적용 여부에 따른 시계열의 특성을 분석하기 위해 Fig. 8에 SR이 적용되지 않은 WR 1.70에서 얻어진 전 저항 계수 시계열과 SR이 측면 경계에서부터 $y/L_{pp}=0.07$ 까지 적용된 WR 0.07에서 얻어진 전 저항 계수 시계열을 나타낸 그림이다. Fig. 8을 보면 SR이 적용되지 않은 WR 1.70에서 얻어진 전 저항 계수 시계열은 초기 일정 시간 이후 주기적인 진동을 한다. 반면 SR이 적용된 WR 0.07에서 얻어진 전 저항 계수 시계열은 초기 일정 시간 이후 일정한 값을 가진다. 이에 전 저항 계수 시계열의 위상에 따른 분석을 위해 정수압을 제외한 선측 압력 분포와 선체 주위 속도 분포를 식 (12)과 (13)로 정의하였다.

$$\Delta C_p(t) = (p(t) - p_{mean}) / (\frac{1}{2} \rho V_M^2) \tag{12}$$

$$\Delta u(t) = (u(t) - u_{mean}) / V_M \tag{13}$$

식 (12)에서 p는 물의 밀도이며, V_M 은 설계 속도이다. p(t)는 각 시간에서 선체에 작용하는 정수압을 제외한 압력이며, p_{mean} 은 선체에 작용하는 정수압을 제외한 압력의 시간 평균값이다. 식(13)의 $u(t)$ 는 각 시간에서 선체 주위 속도이며, u_{mean} 은 u(t)의 시간 평균값이다. 즉 식 (12)과 (13)을 보면 $\Delta C_p(t)$ 와 $\Delta u(t)$ 는 평균 압력, 평균 속도보다 높을수록 양의 값을 가지며 낮을수록 음의 값을 가진다. SR이 적용되지 않은 WR 1.70의 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수 시계열의 위상이 최대, 최소인 $tV_M/L_{pp} = 7.7, 8.5$ 에서 $\Delta C_p(t)$ 와 $\Delta u(t)$ 를 Fig. 9와 10에 나타내었다.

Fig. 9는 $\Delta C_p(t)$ 를 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)와 (b)의 왼쪽 그림은 SR이 적용되지 않은 WR 1.70의 해석 결과이며, 오른쪽 그림은 감쇄 영역이 측면 경계에서부터 $y/L_{pp}=0.07$ 까지 적용된 WR 0.07의 해석 결과이다. Fig. 9(a)와 (b)를 보면 WR 1.70의 $\Delta C_p(t)$ 는 시간에 따라 변하는 것을 볼 수 있으나, WR 0.07의 $\Delta C_p(t)$ 는 각 시간에서 일정한 값을 가진다. Fig. 10은 $z/L_{pp}=0$ 에서 $\Delta u(t)$ 를 나타낸 그림이다. Fig. 10(a)와 (b)의 위쪽 그림은 SR이 적용되지 않은 WR 1.70의 해석 결과이며, 아래쪽 그림은 감쇄 영역이 측면 경계에서부터 $y/L_{pp}=0.07$ 까지 적용된 WR 0.07의 해석 결과이다. Fig. 10(a)와 (b)를 보면 WR 1.70의 $\Delta u(t)$ 는 시간에 따라 변하지만 WR 0.07의 $\Delta u(t)$ 는 각 시간에서 일정한 값을 가진다. 이러한 현상은 SR이 적용된 영역의 속도나 VOF가 계산 값($\Phi_{computed}$)과 시간에 대해 일정한 이론 값(Φ_{target})사이에서 분포하게 되어 시간에 대한 $\Delta u(t)$ 의 변화가

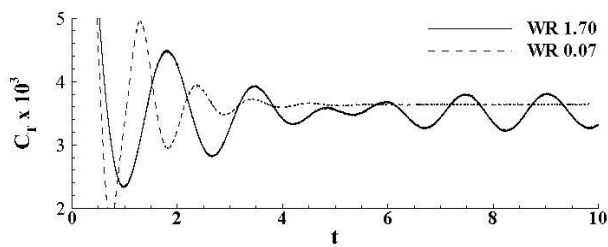
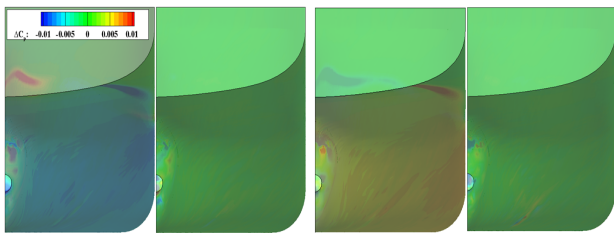
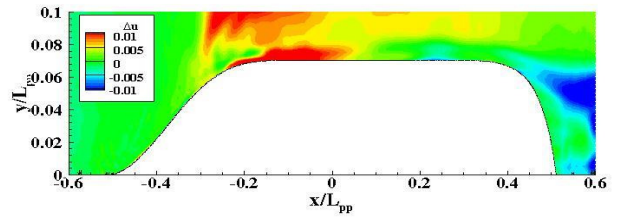


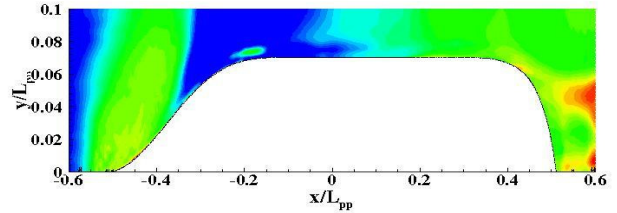
Fig. 8 Time histories of total resistance coefficients for WR 1.70 and WR 0.07



(a) $\Delta C_p(t)$ at $tVM/L_{pp} = 7.7$ (b) $\Delta C_p(t)$ at $tVM/L_{pp} = 8.5$
Fig. 9 Comparison of $\Delta C_p(t)$ between WR 1.70 and WR 0.07



(a) $\Delta u(t)$ at $tVM/L_{pp} = 7.7$



(b) $\Delta u(t)$ at $tVM/L_{pp} = 8.5$

Fig. 10 Comparison of $\Delta u(t)$ between WR 1.70 and 0.07

작아지며, 이로 인해 시간에 대한 $\Delta C_p(t)$ 의 변화가 작아지게 된다. Table 4에서 WR의 범위가 작아질수록 전 저항 계수 시계열의 감쇠 계수(b)가 증가함을 확인하였다. WR의 범위가 작아질수록 선체 주위의 속도나 VOF가 시간에 대해 일정한 값을 가지게 되며, $\Delta C_p(t)$ 와 $\Delta u(t)$ 의 변화가 작아지게 된다. 이로 인해 최종적으로 전 저항 계수 시계열의 감쇠 계수(b)가 증가하였으며, 식 (11)의 수렴선이 0이 되었다. 정수 중 선체 저항을 해석하는 경우 선측 압력 변화로 전 저항 계수의 시계열이 주기적인 진동하므로 식 (11)의 수렴선이 0이 되지 않는 감쇠 계수(b)를 가지는 WR을 선택하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 선체 주위 파의 모사가 선체 저항에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 계산 영역은 1,300만, 2,300만 개의 격자를 사용하였다. 두 계산 영역의 해석 결과로부터 얻어진 선체 주위 파형과 $y/L_{pp}=0.0741$ 에서 파형은 서로 비슷하게 모사되었으며, 전 저항 계수도 잘 일치하였다. 이에 본 연구에서는 계산 시간의 효율성을 위해 1,300만개의 격자를 이용하여

연구를 진행하였다. 측면 경계에 감쇄 영역을 설정하여 선체 주위 파형이 모사되는 영역을 변경시켜 선체 주위 파형이 모사되는 영역의 범위가 선체 저항에 미치는 영향을 분석하였다. 서로 다른 선체 주위 파형이 모사되는 영역에서 얻어진 전 저항 계수의 시간 평균값은 오차 범위 $-1.15\% \sim +2.1\%$ 로 비교적 잘 일치하였으나 전 저항 계수의 시계열의 특성이 달라짐을 확인하였다. 전 저항 계수의 시계열은 진폭이 시간이 지남에 따라 감소하는 감쇠 진동의 그래프 형상을 가지므로 전 저항 계수의 시계열을 감쇠 진동의 일반화로 정의하고 수렴선을 추정하였다. 수렴선의 감쇠 계수(b)는 선체 주위 파형의 모사 영역이 감소됨에 따라 증가하였다. 이에 WR 1.70의 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수 시계열의 위상이 최대, 최소가 되는 시간에서 $\Delta C_p(t)$ 와 $\Delta u(t)$ 의 변화를 확인하였다. SRI가 적용됨에 따라 $\Delta C_p(t)$ 와 $\Delta u(t)$ 의 변화가 작아지게 되고 이로 인해 전 저항 계수 시계열의 감쇠 계수(b)가 증가하였다. 이는 현업에서 정수 중 저항 성능을 해석하는 경우 전 저항 계수 시계열의 특성을 감쇠 계수(b)를 이용하여 정량화할 수 있으며, WR의 범위가 선체 저항에 미치는 영향에 대해 정량적인 평가가 가능하다. 이와 같은 정량적인 평가는 WR의 범위에서 기인하는 수치 오류 제거에 도움이 될 것이다.

본 연구는 설계속도에서 분석을 진행하였으므로 다양한 프루드 수에 대한 추가 연구를 진행 중이다. 선체에서 퍼져 나가는 켈빈 파의 모사가 선체 저항에 영향을 미치는 원인에 대해 보다 물리적으로 분석할 예정이다. 이러한 추가적인 연구를 위해 본 연구는 측면 경계 감쇄 영역 설정에 따른 선체 주위 파형의 모사 영역의 범위가 전 저항 계수의 시계열의 영향을 분석한 기초 연구로써 의의가 있다.

후 기

본 연구는 2020년도 정부(산업자원부)의 재원으로 “중견조선소 혁신성장개발사업”의 “중견조선소용 LNG 추진 선박 및 성능 해석 시스템 개발”과제의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다 (No. 20006790).

References

- Afshar, M.A., 2010. *Numerical wave generation in OpenFOAM®*. Master's Thesis. Chalmers University of Technology.
- Choi, J.E., Kim, J.H., Lee, S.B. & Lee, H.G., 2009. Computational prediction of speed performance for a ship with vortex generators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(2), pp.136–147.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman D.R. & Fredsøe J., 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70, pp.1073–1088.
- Jun, J.H., Lee, S.E., Kwon, J.W. & Son, J.W., 2011. Analysis of flow around ship using unstructured grid. *Proceeding of KSCFE Spring Annual Meeting*, May 2011 187–193.
- Jones, D.A., 2015. *CFD RANS simulations on a generic conventional scale model submarine: comparison between Fluent and OpenFOAM*, Defence Science and Technology Group TN-1449.
- Kim, J., Park, I.Y., Kim, K.S. & 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.
- Kim, W.J., Van, S.H., & Kim, D.H., 2001. Measurement of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, 31(5), pp. 567–578.
- Kim, C.K. et al., 2017. Analysis of added resistance and seakeeping responses in head sea conditions for low-speed full ships using URANS approach. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9, pp.641–654.
- Kim, Y.J. & Lee, S.B., 2017. Effects of trim conditions on ship resistance of KCS in short waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), pp.258–266.
- Launder, B.E., & Spalding, D.B., 1972. *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press, UK.
- Lee, S.B. & 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.
- Luo, W.Z. et al., 2016. Numerical simulation of viscous flow field around ships in ballast. *Journal of Coastal Research*, 32(4), pp.911–922.
- Park, D.W., Lee, S.B., Churg, S.S. & Kwon, J.W., 2013a. Effects of trim on resistance performance of a ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.88–94.
- Park, S. et al., 2013b. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(1), pp.33–46.
- Peric, R. & Abdel-Maksoun, M., 2016. Reliable damping of free surface waves in numerical simulations. *Ship Technology Research*, 63, pp.1–13.
- Pope, S.B., 2000. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, UK.
- Tezdogan, T., Incecik, Atilla. & Turan, Osman., 2016. Full-scale unsteady RANS simulations of vertical ship motions in shallow water. *Journal of Ocean Engineering*, 123, pp.131–145.
- Van, S.H. et al., 1998. Experimental investigation of the flow characteristics around practical hull forms. *Proc. of the 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design*, Osaka, Japan, 25–27 May 1998,

pp. 215-227.

Van, S.H., Kim, W.J., Yim, G.T. & Kim, D.H., 2000. Experimental investigation of local flow around KRISO 3600TEU container ship model in towing tank. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(3). pp.1-10.



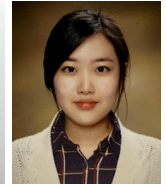
강민재



오석환



김찬우



윤미진



이상봉