

# 단파장 영역에서 운항 자세가 KCS의 선체 저항에 미치는 영향

김연주·이상봉<sup>†</sup>  
동아대학교 조선해양플랜트공학과

## Effects of Trim Conditions on Ship Resistance of KCS in Short Waves

Yeoun Joo Kim·Sang Bong Lee<sup>†</sup>

Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University

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.

Numerical simulations of turbulent two phase flows around KCS have been performed to investigate effects of trim conditions on ship resistance of KCS in short waves by utilizing waves2foam. The wave lengths of LPP/2 and LPP/4 with 1m and 2m wave heights were imposed at inlet boundary. The resistance reduction at 2m trim by head and the increase of resistance at trims by stern were observed regardless of wave lengths and wave heights. The hull pressure on fore-and-aft rather than wave patterns around bulbous bows was mainly responsible for the total resistance coefficients of KCS in short waves. A phase diagram of contribution of hull pressure to the total resistance coefficients disclosed that the phase of representing the maximum resistance in time history played an important role in the effect of trim conditions on ship resistance of KCS in short waves.

**Keywords** : Trim condition(운항 자세), Added resistance(부가 저항), Ship resistance(선체 저항), Regular wave(규칙 파), Short waves(단파장)

## 1. 서론

최근 선박에서 배출되는 대기 오염 물질에 대한 규제가 강화됨에 따라 선박의 운항 자세 제어를 통해 연료를 절감하고자 하는 연구가 많이 수행되었다. 대표적으로 Park, et al. (2013)에서는 운항 자세에 따라 Star-CCM+를 이용한 수치 해석을 수행하여 압력저항이 평형 상태를 기준으로 선수 트림에서 약 20% 감소하고, 선미 트림에서 약 20% 증가한 것을 확인하였다. 평형 상태보다 선미 트림에서 조파 저항이 증가하는 현상은 SHIPFLOW를 이용한 수치 해석에서도 확인할 수 있었다 (Seo, et al., 2009). 비단, 연료 절감의 목적이 아니더라도 대형 유조선에 대해 모형 시험을 수행하여 선박의 운항 자세에 따른 유효 마력이 추정된 바 있다 (Yang & Kim, 2005).

이전 연구 결과는 정수 중에서 운항 자세에 따른 선박 저항 성능을 추정한 것이므로 실제 해상 상태에서의 선박 성능과 다를 수 있다. 따라서 선박 실성능을 정확하게 추정하기 위해서는 파랑과 해류 등에 의해 발생하는 해면의 요동 상태를 고려해야 한다. 특히 파랑에 의해 선박 운동이나 압력 저항이 변할 수 있으

므로 파랑을 고려한 상태에서의 선박 저항 성능 추정이 필요하다. 최근 실운항 시 선박 성능에 따른 연료 소모량에 대한 선주들의 관심과 문의가 증가하고 있고, 이에 대해 각 조선사들이 대응 방안을 마련하기 위해 노력중임을 감안할 때 실해상 상태에서의 선박 성능을 추정하는 것이 점차 중요해지고 있다. 그러나 모형 시험 및 수치 해석을 통해 실해상 상태에서의 저항 성능을 추정하는 것은 많은 비용이 필요하므로 대개의 경우 파랑에 의한 부가 저항을 추정하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 실제 해상 상태와 같은 파랑을 고려하기 위해서는 불규칙 파를 적용하여 수치 해석이 수행되어야 하는데, 이 경우 통계적 정상 상태에 도달할 때까지 계산을 수행하여야 한다는 한계로 인해 비현실적으로 많은 시간이 요구된다. 이러한 이유로 다양한 파장( $\lambda$ )과 파고( $H_0$ )를 갖는 규칙 파를 적용하여 선박 저항 성능을 계산한 연구가 선행되었는데, 규칙 파에 의한 부가 저항 문제에 있어 실제 해상 상태가 선박의 길이에 비해 짧은 파장을 가지므로 단파장 영역에서의 선박 성능 추정이 중요하게 연구되었다. Guo & Steen (2011)은 단파장 영역에서 파장에 따른 선박의 운동 응답과 부가 저항을 예측하기 위해 모형 시험을 수행하였다. 또한, 컨테이너선과 원유 운반선에 대해 단파장 영역에서의 부가 저항

을 랜킨패널법, 직교격자법을 이용한 수치 해석을 수행하여 추정하였고, 이를 실험 결과와 비교하여 수치 해석 결과 값이 95%의 신뢰구간에 존재하는 것이 확인되었다 (Park, et al., 2014; Yang, et al., 2015). 특히 파장이 선체 길이의 절반보다 짧은 경우, 파장에 따른 운동이 상대적으로 미미하여 수치 해석이 용이한 점도 단파장에서 부가 저항 추정이 많이 이루어지고 있는 이유이다 (Seo, et al., 2014). 이상의 연구 결과를 종합해보면 선박의 운항 자세에 따른 저항 성능을 추정할 경우 정수 중이 아닌 파랑 중, 특히 단파장 영역에서 수치적 혹은 실험적 연구를 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 지금까지의 연구 결과는 정수 중 선박의 최적 운항 자세 도출에 한정되어 진행되어 왔으며, 이는 최적 운항 자세 도출에 요구되는 많은 경우의 수로 인한 모형시험 비용 증가와 파랑을 고려한 정도 높은 수치 해석의 어려움에서 기인한 것이다. 따라서 본 연구는 정수 중 선수 트림에서 선체 저항이 감소한 바와 같이 파랑 상태에서도 선수 트림의 운항 자세가 저항 성능에 유리한지를 밝히는 기초 연구이다. 이를 위해 단파장을 갖는 규칙 파가 유입되는 조건에서 선박의 운항 자세에 따른 저항 성능 변화를 수치적으로 추정함으로써, 실제 해상 상태에서 운항 자세에 따른 선박 저항 성능을 추정하기 위한 결과를 제공하고자 한다. 조우하는 규칙 파의 파장을 결정함에 있어 파장 길이가 0.5  $L_{pp}$ 보다 클 경우 선박 운동을 고려하여 동적 격자를 구성해야 하므로 정수 중에서 수행한 연구 결과와 파랑 중 선박 저항 값을 비교하는데 있어 격자 변형에 의한 오차를 초래할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 파랑에 의한 선박 운동이 미미한 영역, 즉 파장 길이가 0.5  $L_{pp}$ 이하인 영역으로 한정하여 선박 트림에 따른 선박 저항 성능을 추정하고자 한다 (Yang, et al., 2015).

본 연구에서는 소스가 공개된 OpenFOAM 라이브러리 중 waves2foam을 이용하여 파랑 중 선박 저항 해석을 수행하였으며, 정수 중 저항 해석은 interfoam을 수정한 해석자를 이용하였다. waves2foam은 기존 연구에서 부유식 해상 풍력 모델에 대한 유체-구조 연성 해석 결과를 제공하여 파랑 중 해석에 대한 신뢰도가 이미 검증된 바 있는 해석자이다 (Bruinsma, 2016). interfoam 역시 정수 상태에서 선체 저항을 정도 높게 예측할 수 있음을 기존 연구에서 통계적 신뢰도를 통해 확인하였다(Lee & Lee, 2014). 본 연구의 대상선은 KCS이며 해석 조건은 설계 속도 24 knots와 설계 흘수 10.8 m로 지정하였으며 운항 자세 조건은 평형 상태를 비롯하여 실선 기준 0~2 m 선수/선미 트림으로 설정하였다.

## 2. 수치 기법

본 연구에서는 자유 수면을 고려하여 선체 저항을 해석하기 위해 비압축성 다상 유동에 대한 Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 수치 해석하였다. 다상 유동을 모사하기 위해 유체 체적법(Volume of Fluid, VOF)을 적용하였으며, 질량 및 운동량 보존을 위한 지배 방정식은 아래와 같다.

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

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

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

여기서 U는 각 방향의 속도 벡터이며,  $\alpha$ 는 각 격자에서 물의 체적을 의미한다.  $\rho$ 는  $\alpha$ 를 고려한 유체 밀도이고, g는 중력 가속도 벡터이다. 편향 점성 응력 텐서 T는  $2\mu_{eff}S - 2\mu_{eff}(\nabla \cdot U)I/3$ 로 계산되며 S는 평균 변형률 텐서이다. 상기 지배 방정식을 이용하여 아래 Fig. 1과 같은 조건에서 선체 저항을 계산하였다. 그림 (a)는 정수 상태에서 평형, 선수/선미 트림 상태를 보여주며, 그림 (b)는 파랑 상태에서 각 운항 자세를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 운항 조건은 Table 1에 정리한 바와 같이 설계 흘수 10.8 m에서 평형 상태를 비롯하여 선수 트림, 선미 트림을 적용한 선박 운항 자세에서 계산을 수행하였으며, 설계 속도 24 knots로 운항할 경우의 선체 저항을 분석하였다. 선수/선미 트림은 실선 기준 TA-TF=0 m,  $\pm 1$  m,  $\pm 2$  m, -3 m, -4 m로 설정하였다. TF와 TA는 각각 선수 수선과 선미 수선에서의 흘수이다. 한편 파랑의 위상에 따른 저항 변화의 원인을 면밀히 고찰하고 수치적 효율성을 높이기 위해 초기 운항 자세로 고정된 조건하에서 저항 해석을 수행하였다.

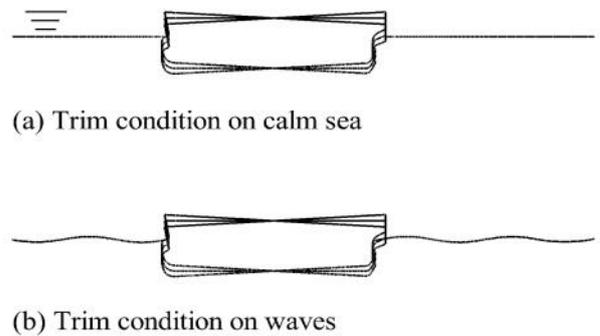


Fig. 1 Conditions of trim : (a) on calm sea, (b) on waves

Table 1 Operating conditions of KCS

$V_s$ (knot)	Draft(m)	Trim(m)*
24	10.8	0
		$\pm 1.0$
		$\pm 2.0$
		-3.0, -4.0

\* 0 : even keel, - : trim by head, + : trim by stern

본 연구에서 사용한 격자 및 수치 기법의 타당성을 검증하기 위해 정수 중 평형 상태의 설계 속도에서 전 저항 계수( $C_T$ )를 구

하였다. 대상선의 실선 및 모형선 주요 치수는 아래 Table 2와 같다. 고정 상태에서  $C_T=3.536 \times 10^{-3}$ 으로 계산되었으며, 이는 Van, et al. (1998)에서 보고된  $3.557 \times 10^{-3}$ , Kume, et al. (2000)에서 계측된  $3.519 \times 10^{-3}$ 과 잘 일치한다. 부가저항은 파장과 파고에 민감한 문제이므로 단파장 조건 내에서 여러 파조건에 따른 선체 저항을 계산하기 위해 Table 3과 같은 파랑 조건을 적용하였다. 선박의 전진 속도에 따른 조우 주파수를 고려하여 식 (4)를 적용하였다. 본 연구에서는 초동파(head wave)를 적용하였으므로 입사각  $\psi=180^\circ$ 이다.

Table 2 Principal particulars of KCS

Particulars	Full scale	Model scale
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 <sup>3</sup> )	52,030	1.6490
Wetted surface area without rudder (m <sup>2</sup> )	9424	9.4379

Table 3 Wave conditions

	$\lambda/L_{pp}$	$H_0(m)^*$
Case 1	0.5	2
Case 2	0.5	1
Case 3	0.25	2

\* full-scale

$$\omega_e = \omega_W - \frac{\omega_e^2 V \cos \psi}{g} \quad (4)$$

본 해석에 사용한 수치 해석 영역은 Fig. 2와 같다. 좌표축의 원점은 선체 중심과 자유 수면이 만나는 곳에 위치하며, 선수에서 선미 방향을 +x, 선체 중심에서 우현 방향을 +y, 중력 가속도의 반대 방향을 +z로 정한다. 선수에서 입구 경계까지의 거리는  $1.0 L_{pp}$ 이고, 선미에서 출구 경계까지의 거리는  $2.5 L_{pp}$ 이다. 폭 방향은 켈빈 파(Kelvin wave)의 왜곡을 방지하기 위해  $1.5L_{pp}$ 로 설정하였다. OpenFOAM 라이브러리 중 waves2foam은 파랑을 모사하기 위해 1차, 2차, 5차 Stokes 파랑 이론, 수심에 비해 파장이 매우 긴 경우에 사용되는 크노이드 이론과 2차원 유동에 제한된 유선 함수 이론을 기반으로 한 해석자이다 (Jacobsen, et al., 2012). 본 연구에서는 동적 경계 조건의 1차 Stokes 파랑 이론을 사용하였다. 1차 Stokes 파랑 이론이 중력에 의한 실제 파형과 차이가 있으나, 본 연구의 목적은 자세에 따른 선체 저항

이 파랑 상태에서 어떻게 변하는지를 관찰하는데 있으므로 파의 위상을 명확하게 규정할 수 있는 1차 Stokes 파랑 이론을 적용하여 수치 해석을 수행하였다. 선수에서 발생하는 반사파가 입사파를 교란시킬 수 있으므로 입구 경계에 감쇄 영역을 설정하였고, 또한 출구에서 발생할 수 있는 반사파를 제거하기 위해 출구 경계에도 감쇄 영역을 설정하였다. wave2foam에 적용된 감쇄 영역에 대한 함수식은 이전 연구의 식을 활용하여 설정되었다 (Mayer, et al., 1988).

$$\alpha_R(\chi_R) = 1 - \frac{\exp(\chi_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \chi_R \in [0; 1] \quad (5)$$

$$\phi = \alpha_R \phi_{computed} + (1 - \alpha_R) \phi_{target} \quad (6)$$

여기서  $\chi_R$ 은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각 감쇄 영역이 시작되는 지점과 끝나는 지점에서 0 혹은 1을 갖도록 설정된 변수이다.  $\alpha_R$ 은  $\chi_R$ 에 따라 0에서 1까지 변하는 가중 함수로써 속도나 VOF를 계산 값( $\phi_{computed}$ )과 이론값( $\phi_{target}$ ) 사이에 분포하도록 만든다. 기존 연구를 참조하여 어댑티드 격자(adapted mesh)와 프리즘 격자(prism layer)를 사용하였고, 생성된 전체 격자 수는 148만~157만개이다 (Lee & Lee, 2014). 어댑티드 격자는 특정 공간에 격자를 밀집시키되, 격자의 직교성을 유지하기 위해 고안된 다면체 격자이다. 어댑티드 격자를 사용할 경우 직교 격자계를 효율적으로 밀집시킬 수 있는 장점이 있으나, 곡률이 심한 벽면에서 격자 간격을 일정하게 유지하기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 벽면과 평행한 방향으로 프리즘 격자를 생성하였다. 본 연구에서는 선체 주변에 총 5층의 프리즘 격자를 구성하였고, 첫 번째 벽면 격자 간격은 선체 전체의 y+ 평균값이 30~40이 되도록 설정하였다. 측면 경계 조건을 결정하기 위해 대칭 경계 조건과 감쇄 조건을 적용하였을 때 그 결과가 일치하였으므로 대칭 경계 조건을 적용하더라도 측면 반사파에 따른 왜곡이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 측면 경계에 대칭 경계 조건을 적용하였다.

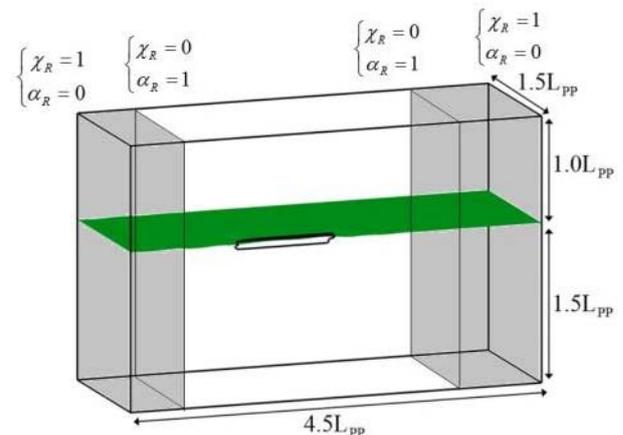


Fig. 2 Numerical domain

Reynolds 응력에 대한 난류 종결(turbulence closure)을 위해  $k-\omega$  SST 모델을 사용하였고, 선체 표면에서 벽함수(wall function)를 적용하였다. 시간에 대해 1차 Euler기법으로 차분하였으며, 공간에 대해 선형 보간을 이용하여 차분하였다. 안정적인 수치 계산을 위해 OpenFOAM에서 제공하는 linear-upwind 제한자(linearUpwind limiter)를 반영하였다. 제한자가 적용되는 격자를 추적한 결과 30~50개의 격자에 대해 upwind가 적용됨을 확인하였다. 2차 정확도의 vanLeer 기법으로 계산한 결과와 전 저항 계수가 일치하는 것으로 보아 upwind가 적용된 격자가 전 저항 계수에 미치는 영향은 무시할 만하다. 다만 vanLeer 기법을 적용한 경우 일부 계산에서 수치적 불안정성이 발생하므로 본 연구에서는 linear-upwind 제한자를 사용하였다. 계산 시간 간격에 따른 수치적 불안정성을 해결하기 위해 최대 Courant 수를 2.0으로 설정하여 가변 시간 간격을 사용하였다. 본 과제의 목표는 선박의 운항 자세에 따라 정수 중에서의 선체 저항과 파랑 중에서의 선체 저항을 비교하는데 있다. 따라서 선체 운동을 배제하기 위해 진폭 응답 함수(response amplitude operator, RAO)를 검토하여 파장의 길이를  $L_{pp}/2$  이하로 적용하였다. 파장 길이에 따른 RAO는 기존 연구에서 많이 보고되었는데, Seo, et al. (2014)에서 연구된 바와 같이  $L_{pp}/2$  이하에서는 파랑에 의한 선체 운동이 상대적으로 중요하지 않다고 볼 수 있다.

파랑 중 저항 해석을 위해 파의 높이를 Beaufort 3, 4(BF 3, 4)로 설정하였는데, 실선 기준 1~2 m임을 감안하여 모형선 기준으로 축척하여 0.0315 m, 0.063 m를 적용하였다. 파가 진행하는 수치 공간에서 격자 간격이 파고에 미치는 영향을 살펴보기 위해 먼저 2차원 공간에서  $\Delta x$ 와  $\Delta z$ 의 변화에 따른 파랑의 변화를 살펴보는 것이 필요하다. 아래 Fig. 3과 같이 정렬 격자를 사용하여 x축 방향의 격자 간격과 z축 방향의 격자 간격을 변화시켜가며 파의 높이가 왜곡되지 않는 격자 간격을 선정하였다. 파랑을 수치 모사하기 위한 격자 검증에 있어 이론 해와의 비교, 실험 결과와의 비교 등 다양한 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 점성을 고려한 파랑 해석을 긴 시간동안 수행할 경우 수치 확산 및 반사파에 의한 해의 왜곡을 우려하여 격자 크기 및 수치 기법이 파고에 미치는 영향을 관찰한 기존 연구를 참고하였다 (Apsley & Hu, 2003; Afshar, 2010). 그림 (a)는  $\Delta z$ 를 고정된 상태에서 x축 방향의 격자 간격에 따른 파고의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 검은 선은 한 파장에 60개의 격자를 생성한 경우이며, 붉은 선과 푸른 선은 각각 검은 선을 기준으로 1/2배, 2배의 격자를 생성한 경우이다.  $\Delta x$ 가 0.125 m(붉은 색)인 경우 0.03125m(푸른 색)인 경우보다 격자 간격이 넓어 파의 높이가 약 28% 줄어들었다. 반면  $\Delta x$ 를 0.0625m(검은 색)로 설정한 경우 0.03125 m(푸른 색)인 경우와 비교하여 7% 이내의 변화를 보이므로  $\Delta x$ 를 0.0625 m로 설정하는 것이 효율적이다. Fig. 3(b)는  $\Delta x=0.0625$  m에서  $\Delta z$ 를 한 파고에 20개의 격자를 생성한 경우(검은 선), 붉은 선과 푸른 선은 각각 1/2배, 2배의 격자를 생성한 경우의 파고 변화를 나타낸 그림이다. 검은 선과 붉은 선을 비교해 보면 1% 이내에서 증척된 것처럼 보이지만, 이는  $\alpha=0.5$ 를 계면으로 가정하여 선으로 나타내었기 때문에 발생하는 현상이다. 계면에서 유체 체적을 연속적 분포로 나타내었을 때,

$\Delta z$ 가 커질수록 수치 확산(numerical diffusion)에 의해 계면의 위치가 불확실함을 확인하였다. 따라서 파고의 변화와 수치 확산을 고려하여 파고에 20개의 격자를 생성하여 수치 해석을 수행하는 것이 효율적이다. 정렬 격자에서 선정한  $\Delta x$ 와  $\Delta z$ 를 비정렬 격자계의 자유수면 근처에 적용하여 어댑티드 격자를 구성하였다. 어댑티드 격자계에서 계산된 결과를 정렬 격자의 결과와 비교하여 Fig. 3(c)에 나타내었다. 동일 격자 간격을 적용할 경우 어댑티드 격자와 정렬 격자에서 계산된 파고점(wave crest)이 0.5% 이내에서 일치함을 확인할 수 있다. 정렬 격자에서 82,944개, 어댑티드 격자에서 45,000개의 격자를 각각 사용하였는데, 수치적 효율성을 고려하면 어댑티드 격자를 사용하는 것이 효율적이다. 상기 격자 기준을 적용하여 KCS 주위 3차원 공간 격자를 생성하면, Fig. 4와 같다.

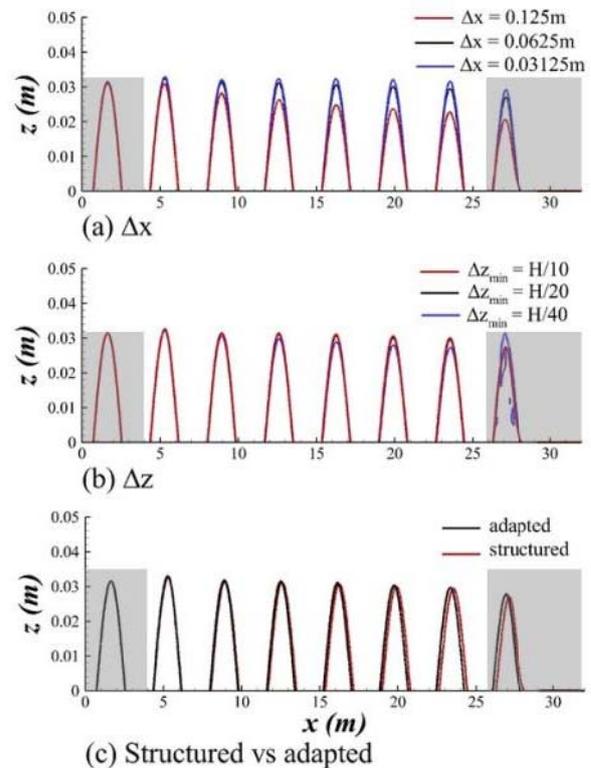


Fig. 3 Comparison of wave heights on several grid systems

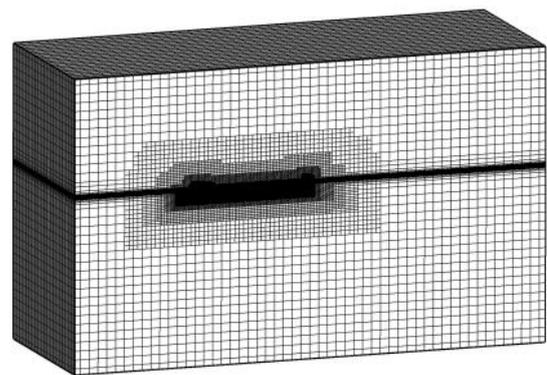


Fig. 4 Grid system on even keel

### 3. 결과 및 고찰

운항 자세별 전 저항 계수를 구하기 위해 20초에서 40초까지 파의 주기를 고려하여 시간 평균하였다. 파랑 조건마다 천이구간 특성과 파 주기가 다르기 때문에 시간 평균 구간의 타당성을 조사하기 위해 Cases 1, 2, 3의 파랑 조건하에서 평형 상태일 때 저항 시계열을 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 보듯이 0초~15초 구간에서 초기 조건에 의한 천이가 발생하고, 20초 이후부터 저항 계수가 통계적으로 수렴하였음을 확인할 수 있다.

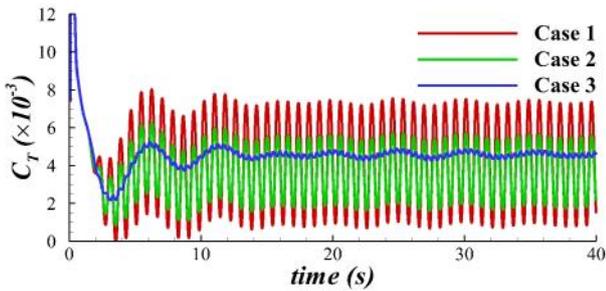


Fig. 5 Time histories of total resistance coefficients

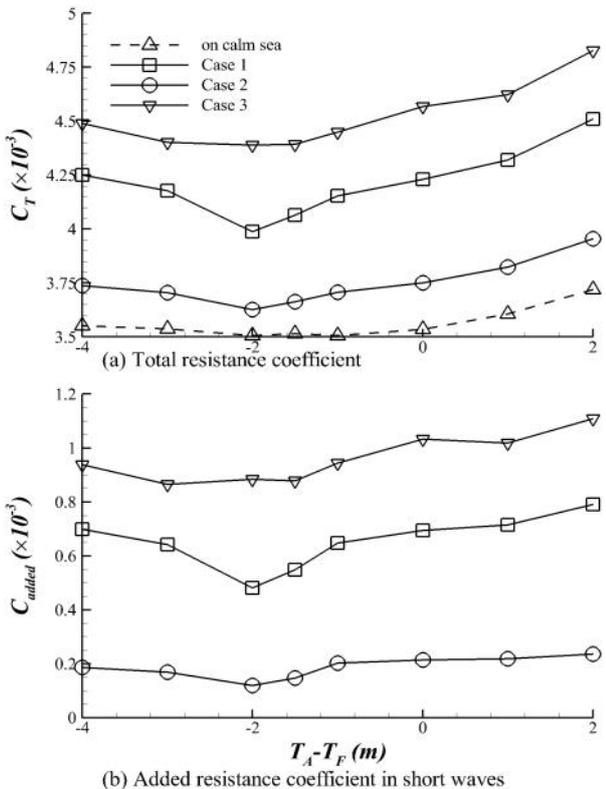


Fig. 6 Total and added resistance coefficients for various trim conditions on waves and calm sea

정수 중과 파랑 상태에서 운항 자세에 따른 전 저항 계수 및 단파장에 의한 부가 저항 계수를 Fig. 6에 나타내었다. 단파장에

의한 부가 저항 계수는 파랑 중 전 저항 계수와 정수 중 전 저항 계수의 차이이다. 그림에서 실선은 파랑 중 전 저항 계수 및 부가 저항 계수를 나타내고 쇠선은 정수 중 전 저항 계수를 의미한다. Case 1(사각 기호)과 Case 2(원 기호)의 비교를 통해 파고가 부가 저항 및 자세에 따른 전 저항 계수에 미치는 영향을 알 수 있는데, Case 1과 정수 중 저항 계수에서 보듯이 파랑 중  $C_T$  값이 정수 상태보다 19%에서 21% 증가하였다. 또한 Case 1과 Case 3(역삼각 기호)의 비교를 통해 파장에 의한 부가 저항 계수의 변화를 추정할 수 있다. 선박의 운항 자세에 따른 저항 계수의 변화를 살펴보면, 정수 상태에서 선박이 운항할 경우 선수 트림 1 m와 2 m사이에서 저항이 가장 작을 것으로 예상되는 반면, 파랑 상태에서는 파고나 파장에 상관없이 선수 트림 2 m 근방에서 저항 계수가 작게 나타남을 확인할 수 있다. 파랑 중 선수 트림 2 m에서 전 저항 계수가 감소하는 원인을 분석하기 위해 Case 1에 대해 평형 상태와 선수 트림 2 m( $T_A - T_F = -2$  m), 선미 트림 2 m( $T_A - T_F = 2$  m)에서 전 저항 계수의 시간 변화를 비교하였다.

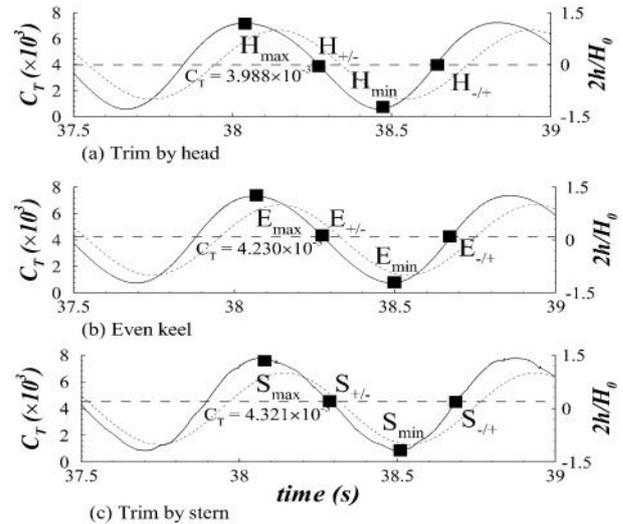


Fig. 7 Time histories of total resistance coefficient denoted by solid lines for various trim conditions, where H, E and S represent trim by head, even keel and trim by stern respectively. The subscripts of 'max', '+/-', 'min' and '-/+' mean the phase of total resistance of coefficients where the phase of waves at FP is represented by dotted lines for reference

Case 1에 대해 평형 상태와 실선 기준 선수/선미 트림 2 m인 운항 자세에서 37.5초에서 39초까지의 전 저항 계수를 Fig. 7에 나타내었다. 쇠선은 전 저항 계수의 평균값으로  $C_T$ 의 시간 변동을 평가하는 기준으로 볼 수 있다. 입사파의 위상과 전 저항 계수의 위상 관계를 비교하기 위하여 FP에서 입사파의 위상을 점선으로 나타냈다. 전 저항 계수의 위상을 표기하기 위해 편의상 H는 선수 트림 2 m, E는 평형 상태, S는 선미 트림 2 m로 지정하였으며,  $C_T$ 값이 최대인 시간을 아래 첨자 max, 최소인 시간을

min, 평균값보다 작아지는 시점을 +/-, 커지는 시점을 -/+로 나타내었다. 그림에서 전 저항 계수의 위상이 입사파의 위상보다 앞서있는 것을 볼 수 있는데 이는 입사파가 FP에 도달하기 이전에 구상 선수에 압력 저항을 야기하였기 때문이다. KCS의 정수 중  $C_T$  평균값이  $3.536 \times 10^{-3}$ 이므로 평형 상태에서 전 저항 계수가 약 19%증가하는 것을 알 수 있다. 파랑 중 선박 운항 자세에 따른 전 저항 계수의 평균값 변화를 비교해보면, 평형 상태를 기준으로 선수 트림에서 약 5.7% 감소하였고, 선미 트림에서 약 2.2% 증가하였다. 이러한 저항 변화의 원인을 분석하기 위해 Case 1에 대해 운항 자세에 따라 선수부 주위의 파형이 어떻게 달라지는지 Fig. 8에 나타내었다. 파형을 관찰한 시점은 각각의 저항이 최고가 되는  $H_{max}$ ,  $E_{max}$ ,  $S_{max}$ 이며 FP에서의 파랑 위상 기준으로 볼 때 최고점이 지난 시점이다. 선체 저항에서 보이는 정량적 변화와 달리 선수부 파형에서는 운항 자세에 따른 뚜렷한 차이점을 발견하기 어렵다. 또한 그림 (d)에서 볼 수 있듯이 선측 파형의 변화 역시 명확하지 않다.

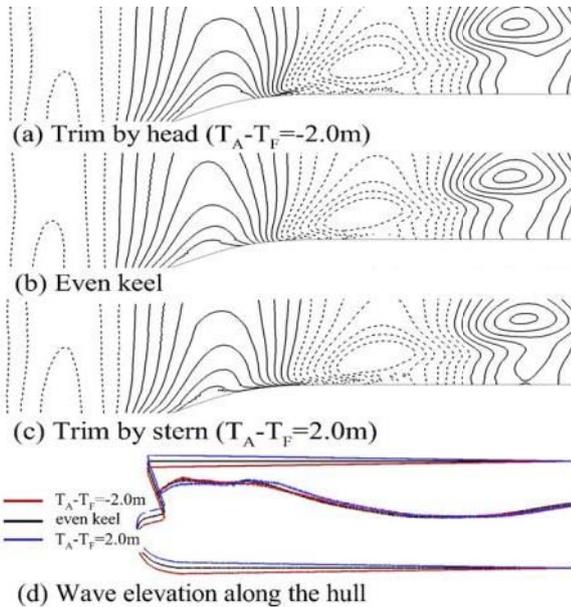


Fig. 8 Wave patterns around and along the hull at trim by head, even keel and trim by stern respectively

저항 변화 원인을 정량적으로 분석하기 위해 저항 성분을 압력 저항과 마찰 저항으로 구분하여 살펴 본 결과 선수/선미 트림에서의 마찰 저항은 평형 상태의 마찰 저항 값의 약 98.8%, 101%인 반면, 압력 저항은 평형 상태의 약 83.4%, 119%인 것을 확인하였다. 운항 자세에 따라 압력 저항이 크게 변하는 원인을 분석하기 위해 전 저항 계수의 위상에 따라 정수압을 제외한 압력 변화를 살펴보고자 한다. 먼저 운항 자세에 따라  $C_T$  값이 최대인 시간에서 선측 압력 분포를 살펴보았다. Fig. 9는 Case 1의  $C_T$  값이 최대인 시간에서 평형 상태, 선수/선미 트림 2 m의 선측 압력 분포이다. 그림 (a)는 선수 트림 2 m에서 선측 압력 분포이고, 평형 상태와 선미 트림에서 선측 압력 분포를 그림 (b), (c)에

각각 나타내었다. 그림 (a)와 (b)를 비교해 볼 때 선수부에서 나타나는 높은 압력 분포가 선수 트림에서 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 선수 트림에서의 전 저항 감소에 기여하였음을 알 수 있다. 반면, 그림 (b)와 (c)를 비교하면 선수부에서의 높은 압력 분포가 선미 트림 상태에서 감소하는 것처럼 보이는데, 이러한 압력 분포는 선미 트림의 전 저항 계수 증가와 배치되는 결과이다.

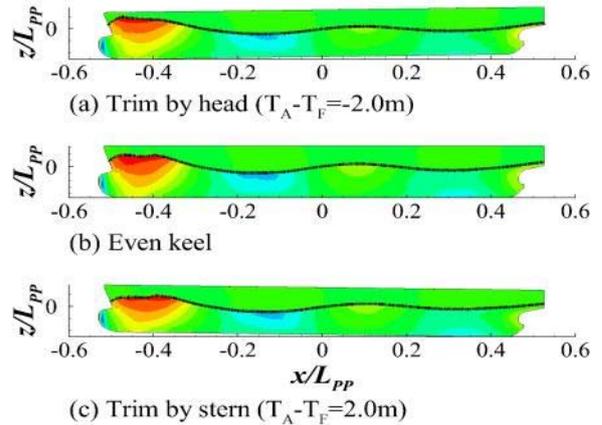


Fig. 9 Side views of hull pressure

이상에서 살펴볼 수 있듯이 각 위상에서 선수부 파형, 선측 파형 및 선측 압력 분포를 통해 전 저항 계수의 변화를 설명하는 것이 명확하지 않으므로 보다 정확한 비교를 위해 운항 자세에 따라 Fig. 7의 4개 시점에서 선수와 선미에서의 압력 분포 변화를 살펴보고자 한다. 이를 위해 전 저항 계수의 동일한 위상에서 운항 자세별 선수, 선미의 압력 분포를 분석하였으며, 트림 상태의 압력 분포 변화를 정량적으로 가시화하기 위해 선수/선미 트림에서 압력 분포를 평형 상태의 압력을 뺀 차이로 나타냈다.

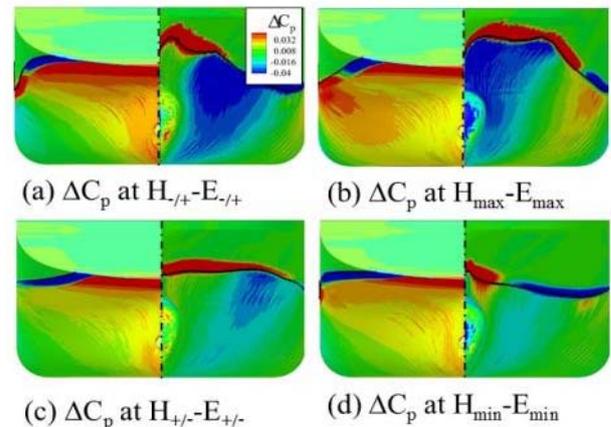


Fig. 10 Comparison of hull pressure between trim by head and even conditions

Fig. 10은 Fig. 7에서 지정한 전 저항 계수의 위상에 따라 선수 트림 2m의 선수/선미 압력 분포에서 평형 상태의 압력을 뺀

차이를 무차원 압력 계수  $C_p$ 를 이용하여 나타낸 그림이다. 선수 트림 2 m에서의 압력이 평형 상태의 압력보다 높을수록 붉은 색으로 표시하였으며 푸른 색은 선수 트림일 때의 압력이 평형 상태보다 낮다는 것을 의미한다. 각 그림에서 선수와 선미를 우측, 좌측에 위치시켰다. 그림 (a)와 (b)에서 선수/선미의 압력 계수 차이( $\Delta C_p$ ) 분포를 살펴보면 선수에서 푸른 영역이 넓게 분포하고 선미에서 붉은 영역이 나타났는데, 이는 선수 트림일 때 평형 상태보다 선수에서 압력이 낮게 계산되고, 선미에서 압력이 높게 나타난 것을 의미한다. 선수 트림과 평형 상태에서 선수/선미의 압력 차이가 극명하게 나타난 것을 보면 평형 상태일 때 보다 선수 트림 2 m에서 전 저항 계수가 감소한 결과에 크게 기여한 것을 알 수 있다. 즉, 전 저항 계수가 평균값보다 커지는 위상(-/+ )과 최대가 되는 위상(max)에서 저항 감소분의 기여도가 매우 높게 나타난다. 반면, 그림 (c)와 (d)에서 볼 수 있듯이 선수와 선미에서 푸른 영역과 붉은 영역이 각각 약하게 나타나므로 전 저항 계수가 평균값보다 작아지는 위상(+/-)과 최소가 되는 위상(min)에서 저항 감소분의 기여도가 거의 없을 것으로 예상된다. 그림 (a)~(d)를 종합해보면 전 저항 계수의 위상에 따른 압력 분포의 차이로 인해 선수 트림에서의 저항 감소분에 대한 기여도가 상이함을 알 수 있다.

Case 1의 전 저항의 계수의 위상에 따라 선미 트림 2m에서도 선수/선미 압력을 평형 상태와 비교하기 위해 선미 트림 2m의 선수/선미 압력 분포에서 평형 상태의 압력을 뺀 차이를 Fig. 11에 나타냈다. 그림 (a)를 살펴보면 전 저항 계수가 평균값보다 커지는 시점(-/+ )에서 선수에 붉은 영역이 넓게 분포하고 선미에서 푸른 영역도 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 선미 트림일 때 평형 상태인 경우보다 선수에서 압력이 높게 계산되고, 선미에서 낮게 계산되었음을 의미하므로 평형 상태일 때보다 선미 트림에서 전 저항 계수가 증가하는 원인이 된다. 전 저항 계수가 최대가 되는 위상에 해당하는 그림 (b)에서 확인할 수 있듯이, 선수에서 붉은 영역이 넓게 나타나고 선미에서 푸른 영역이 약하게 나타나므로 선미 트림에서 압력 저항을 증가시키는 요인이 된다. 그림 (c)와 (d)는 선수/선미의 압력 차이가 약하게 나타나므로 선미 트림에서 압력 저항 증가의 중요한 요인으로 작용하지 않을 것으로 예상된다. 그림 (d)에서 선수 어깨부에서 붉은 영역을 볼 수 있는데 그림 (a), (b)의 결과보다 붉은 영역이 약하게 나타나므로 선미 트림의 압력 저항 증가에 크게 기여하지 못한다. 그림 (a)~(d)에서 선수의 붉은 영역과 선미의 푸른 영역을 고려해보면 선미 트림 2 m에서의 전 저항 계수가 평형 상태인 경우보다 증가하는 원인을 전 저항 계수가 평균값보다 커지는 시점(-/+ )과 최대인 시간(max)에서 압력 차이 분포를 통해 확인할 수 있다.

Case 1에서 전 저항 계수의 위상에 따라 평형 상태의 압력 저항 계수를 기준으로 선수/선미 트림 2m에서 압력 저항 계수의 차이( $\Delta C_{T(p)}$ )를 Table 4에 나타냈다. H-E는 각 전 저항 계수의 위상에서 선수 트림 2 m와 평형 상태의 압력 저항 계수의 차이를 나타내며, S-E는 선미 트림 2 m와 평형 상태의 압력 저항 계수의 차이를 의미한다. 선수 트림 2 m와 평형 상태의 압력 저항 계수 차이를 살펴보면, 전 저항 계수가 평균값보다 커지는 위상

(-/+ )과 최대가 되는 위상(max)에서 선수 트림의 압력 저항 계수가 평형 상태의 경우보다 작게 나타났다. 선수 트림에서 압력 저항 계수가 감소하는 원인을 Fig. 10 (a),(b)의 선수/선미의 압력 차이 분포를 통해 확인할 수 있다. 반면, 선수 트림 2 m에서 선수/선미의 압력 분포를 통해 전 저항 계수가 최소가 되는 위상(min)과 평균값보다 작아지는 위상(+/-)에서 압력 저항 감소분의 기여도가 거의 없을 것으로 예상하였는데 선수 트림의 압력 저항 계수가 평형 상태보다 약간 증가한 것을 정량적으로 확인할 수 있다. 선미 트림 2m와 평형 상태의 압력 저항 계수 차이를 살펴보면, 전 저항 계수의 모든 위상에서 선미 트림의 압력 저항 계수가 평형 상태의 경우보다 증가한 것을 알 수 있다. 특히 전 저항 계수가 평균값보다 커지는 위상과 최대가 되는 위상에서 선미 트림의 압력 저항 계수가 크게 증가하였고, 그 외의 위상에서 선미 트림의 압력 저항 계수가 미세하게 증가하였다.

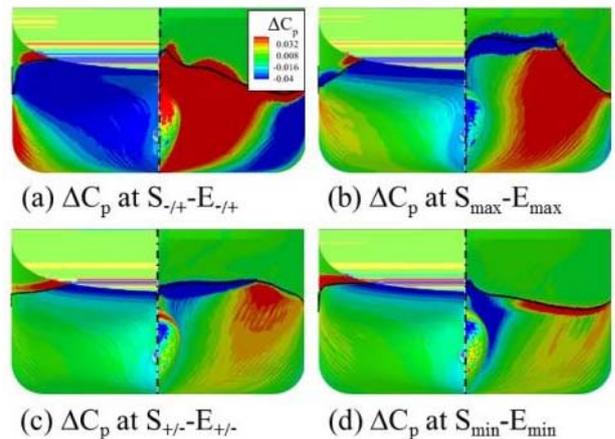


Fig. 11 Comparison of hull pressure between trim by stern and even conditions

Table 4 Contribution of hull pressure to ship resistance by phase

	$\Delta C_{T(p)} (\times 10^{-4})$			
	-/+	max	+/-	min
H-E	-0.974	-1.829	0.7344	0.322
S-E	4.069	3.374	1.114	1.241

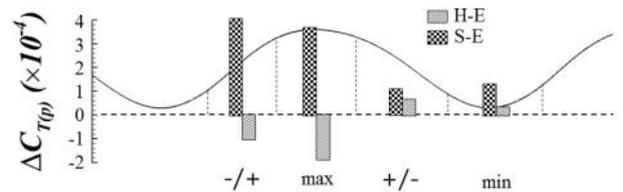


Fig. 12 Phase diagram of contribution of hull pressure to ship resistance

Table 4의 전 저항 계수의 위상에 따른 압력 저항 계수의 증감을 도식화하여 Fig. 12에 나타내었다. 선수 트림에서 전 저항

계수의 감소는 전 저항 계수가 평균값보다 증가하는 위상과 최대가 되는 위상에서 평형 상태보다 작은 압력 저항 계수로 인한 것이다. 선미 트림의 경우 전 저항 계수가 증가하는 원인을 전 저항 계수의 전체 위상에서 확인 할 수 있으며, 특히 전 저항 계수가 평균값보다 증가하는 위상과 최대가 되는 위상에서의 압력 저항 계수로 인해 전 저항 계수가 크게 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 전 저항 계수가 증가하는 위상과 최대가 되는 위상에서의 압력 저항 계수가 파랑 중 선박 운항 자세에 따른 전 저항 계수의 증감에 크게 기여한 것임을 알 수 있다. 이는 선수에 파가 부딪히는 위상에서의 압력 변화에 따라 각 운항 자세별 선체 저항이 결정됨을 의미한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 OpenFOAM의 라이브러리인 waves2foam을 이용하여 파랑 중 선박 운항 자세에 따른 저항 성능 변화를 수치적으로 살펴보았다.  $k-\omega$  SST 모델과 벽함수를 사용하여 선체 저항을 추정하였으며, 기존 정수 중 저항 해석 연구에서 사용한 격자 및 수치 기법을 활용하였다. 파랑의 위상에 따른 저항 변화의 원인을 면밀히 고찰하고 수치적 효율성을 높이기 위해 초기 운항 자세로 고정된 조건하에서 저항 해석을 수행하였다. 정수 중 저항 해석 결과 선수 트림 1m~2m에서 선체 저항이 작게 나타나는 반면, 파랑 중 저항 해석에서는 선수 트림 2m에서 선체 저항이 급격히 감소하였다. 선수 트림 2m에서 추정된 선체 저항을 성분별로 분석한 결과 전 저항 계수의 감소는 압력 저항의 변화와 밀접한 상관이 있음을 확인하였다. 선박의 운항 자세에 따른 압력 저항 변화의 원인을 분석하기 위해 Case 1의 각 운항 자세에서 전 저항 계수의 위상에 따라 압력 저항을 비교, 분석하였다. 정량적인 비교 분석을 위해 선수/선미 트림 2m에서의 선체 압력 분포를 평형 상태의 선체 압력을 뺀 차이로 나타냈다. 전 저항 계수가 평균값보다 커지는 위상과 최대가 되는 위상에서의 압력 변화가 선수 트림과 선미 트림의 압력 저항 계수의 증감에 크게 기여하였다. 즉, 선수에 파가 부딪히는 위상에서 선수/선미의 압력 변화에 따라 각 운항 자세별 선체 저항이 결정됨을 의미한다. 비록 선수 트림은 선미 쪽의 추진기와 타의 잠김 상태와 관련이 있고 이에 따라 추진 및 조종 성능이 달라지므로 저항 성능만으로는 운항 효율을 평가하는 것은 한계가 있으나 파랑 상태에서 운항 자세가 선체 저항에 미치는 영향을 분석한 기초 연구로써 의의가 있다. 따라서 실제 해상 상태에서 운항 자세에 따른 선박 성능 변화를 보다 정교하게 추정하기 위해서는 향후 연구에서 고차 Stokes 파랑 이론을 적용한 수치 해석과 동적 자세 고려와 다양한 파장에서의 저항 해석 및 자항 해석으로의 확장이 필요할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연

구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2016R1C1B1010002)

## References

- Afshar, M.A., 2010. *Numerical wave generation in OpenFOAM®*. Master's Thesis. Chalmers University of Technology.
- Apsley, D. & Hu, W., 2003. CFD simulation of two- and three-dimensional free-surface flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 42, pp.465-491.
- Bruinsma, N., 2016. *Validation and application of a fully nonlinear numerical wave tank*. Master's Thesis. Delft University of Technology.
- Guo, B.J. & Steen, S., 2011. Evaluation of added resistance of KVLCC2 in short waves. *Journal of Hydrodynamics*, 23(6), pp.709-722.
- 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.
- Kume, K. Ukon, Y. Fujisawa, J. Hori, T. Tsukada, T. & Takeshi, H., 2000. *Uncertainty analysis for the KCS model (SRI M.S. No. 631) tests in the SRI 400m towing tank*. SPD Report No. 00-008-1. NMRI: Ship Performance Division, The Ship Research Institute, The Ministry of Transport, Japan.
- Mayer, S. Garapon, A. & Sørensen L.S., 1988. A fractional step method for unsteady free-surface flow with applications to non-linear wave dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 28(2), pp.293-315.
- 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.
- Park, D.M. Seo, M.G. Lee, J.H. Yang, K.K. & Kim, Y., 2014. Systematic experimental and numerical analyses on added resistance in waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(60), pp.459-479.
- Park, D.W. Lee, S.B. Chung, S.S. Seo, H.W. & Kwon, J.W., 2013. Effects of trim on resistance performance of a ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.88-94.
- Seo, K.C. Atlar, M. Kim, H.J. & Chun, H.H., 2009. Minimization of wave-making resistance for inclined

keel containment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(2), pp.97-104.

Seo, M.-G. Yang, K.-K. Park, D.-M. & Kim, Y., 2014. Numerical analysis of added resistance on ships in short waves. *Ocean Engineering*, 87, pp.97-110.

Van, S.H. Kim, W.J. Yim, G.T. Kim, D.H. & Lee, C.J., 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.

Yang, J.M. & Kim, H.C., 2005. Prediction of propulsive performance of VLCC at heeled and trimmed conditions. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.307-314.

Yang, K.K. Seo, M.G. & Kim, Y., 2015. Analysis of added resistance in short waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(4), pp.338-348.

