

선수 규칙파 중 KCS의 부가저항 및 운동성능 수치해석

서성욱·박선호[†]
한국해양대학교 해양공학과

Numerical Simulations of Added Resistance and Motions of KCS in Regular Head Waves

Seonguk Seo·Sunho Park[†]
Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean 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.

As the International Maritime Organization (IMO) recently introduced the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships building and the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) for ship operation, thus an accurate estimation of added resistance of ships advancing in waves has become necessary. In the present study, OpenFOAM, computational fluid dynamics libraries of which source codes are opened to the public, was used to calculate the added resistance and motions of the KCS. Unstructured grid using a hanging-node and cut-cell method was used to generate dense grid around a wave and KCS. A dynamic deformation mesh method was used to consider the motions of the KCS. Five wavelengths from a short wavelength ($\lambda/LPP=0.65$) to a long wavelength ($\lambda/LPP=1.95$) were considered. The added resistance and the heave & pitch motions calculated for various waves were compared with the results of model experiments.

Keywords : Added resistance(부가저항), Ship motion(선박운동), Regular head wave(선수 규칙파), Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학), OpenFOAM(오픈폼)

1. 서론

최근 전 세계적으로 온실가스 배출량 감축을 위한 친환경 운동에 대한 관심이 증가하고 있다. 국제해사기구(IMO)는 선박에서 대기로 방출하는 온실가스의 양을 규제하기 위해 기존의 운항중인 선박에 대해서는 선박운항 연비지표(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI), 신조선 설계에 대해서는 선박제조 연비지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 도입하였다. 이에 따라 조선 및 해운 업계에서는 선박 연료 및 운항 효율에 관심을 가지기 시작하였으며 부가저항을 감소시키는 방법에 대한 연구를 진행하고 있다. 부가저항이란 선박이 실제 해상에서 운항하는 경우 파랑이나 바람에 의해 받는 저항을 의미하며, 일반적으로 부가저항은 정수 중에서 운항 대비 약 15~30%까지 커지는 경우도 발생한다(Arribas, 2007). 따라서 신조선 설계 단계에서 선박의 운항 효율을 향상시키기 위해 실제 운항 상태에서의 정확한 선박의 저항 성능을 추정하고 이에 대한 부가저항을 정확히 예측하고자 하는 연구들이 활발히 진행되고 있다.

선박의 부가저항에 대한 연구는 주로 실험에 의존해 왔다. Strom-Tejse, et al. (1973)은 Series 60 선형, Fujii and Takahashi (1975)와 Nakamura and Naito (1977)은 S175 컨테이너선에 대한 부가저항 실험 연구를 수행하였다. 또한, Journee (1992)는 4가지 Wigley 선형에 대한 체계적인 부가저항 실험을 수행하였다. Park, et al. (2015)는 모형실험에서 여러 가지 조건에 대한 반복실험을 통해 부가저항 실험 값의 신뢰도를 파악할 수 있는 체계적인 불확실성 연구를 제시하였다.

부가저항 추정에 관한 수치적인 방법으로는 주로 포텐셜 이론에 기반하여 진행되었다. Far-field 방법 (Gerritsma & Beukelman, 1972), Near-field 방법 (Faltinsen, et al., 1980), Rankine panel 방법 (Joncquez, et al., 2008; Kim & Kim, 2011)이 지속적으로 연구되고 있다. Seo, et al., (2013)은 3가지 수치해석 기법(스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법)을 적용하여 파랑 중 선박의 부가저항 계산을 수행하여 각 기법의 계산 정도를 비교하였다.

최근 점성을 고려할 수 있는 전산유체역학(Computational

fluid dynamics, CFD) 방법을 이용한 수치적 연구가 비약적인 발전을 이루고 활용 폭 또한 넓어지면서 CFD를 이용한 선박의 부가저항 해석에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. Sato, et al. (1999)는 밀도함수법(The marker-density-function method)을 이용하여 Wigley 선형과 series 60 선형을 대상으로 파랑 중 heave와 pitch 운동에 대해 연구하였다. 또한, Orihara and Miyata (2003)은 WISDAM-X라는 프로그램과 중첩 격자계를 이용하여 SR-108 선박에 대한 부가저항을 해석하였으며, Park, et al. (2013)은 WAVIS 2.2 프로그램을 사용하여 DTMB 5415 선형을 대상으로 두 가지 선속 조건에 대한 부가저항을 해석하였다. Simonsen, et al. (2013)은 KCS 선박에 대해 URANS codes를 사용한 CFD 방법과 모형시험 결과를 비교 및 검증하였다. 비슷한 방법으로 Sadat-Hosseini, et al. (2013)은 KVLCC2 선박을 전후 동요 운동을 구속한 상태와 구속하지 않은 상태로 구분하여 CFD 방법과 모형시험 결과를 비교 및 검증하였다. Tezdogan, et al. (2015)는 KCS 선박을 실제 크기에서 저속운항을 할 때, CFD 방법 및 포텐셜 방법에 대한 계산 결과를 모형시험 결과와 비교한 후 계산방법 차이에 따른 손실가스 배출량 차이를 비교하였다. Oh, et al. (2015)는 랜킨패널법(MSH)과 상용 CFD(STAR-CCM+)를 이용하여 AFRAMAX급 유조선의 파랑 중 부가저항을 계산하였고 결과를 모형시험과 비교하였다.

부가저항 해석결과는 격자의 상태나 해석방법, 해석프로그램에 따라 차이가 발생한다. 부가저항 결과의 분산을 줄이기 위해 2010 Gothenburg, 2015 Tokyo CFD Workshop 등을 통해 각 기관마다 다양한 수치해석 프로그램으로 해석한 부가저항 값을 비교 및 검토하고 있으며 보다 더 정확한 부가저항 값을 얻기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

최근 라이선스 비용이 없고 소스코드가 공개된 OpenFOAM 해석 프로그램을 사용하여 조선과 해양산업 연구들이 진행되고 있다. OpenFOAM을 이용한 선박 저항 연구로서, Park, et al. (2013)은 OpenFOAM 소스공개 라이브러리를 사용하여 조선 및 해양 산업에 활용할 수 있는 선체 저항 성능 해석 라이브러리인 SNUFOAM을 개발 하였다. Seo, et al. (2016)는 OpenFOAM을 이용하여 선체 저항성능에 대해 격자 크기, 시간 간격, 반복 횟수에 대한 종합적인 불확실성을 고찰하였다. Shen, et al. (2015)는 OpenFOAM에 동적 중첩격자 기술(dynamic overset grid technique)을 적용하여 KCS 선박의 추진성능 및 운항성능을 평가하였다. Vukcevic, et al. (2016a, 2016b)는 비점성 해석코드와 점성 해석코드를 결합한 유체동역학 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 KCS 선형에 대한 선속 규칙파 중 부가저항과 운동성능을 계산하였다. OpenFOAM의 표준 solver 중 체적비 이송방정식을 이용하여 2상 유동(two-phase flow)을 해석할 수 있고 동적 자세 변화를 고려할 수 있는 interDyMFoam를 사용하였고, 여기에 파랑을 표현할 수 있는 waves2Foam을 결합하였다 (Jacobsen, et al., 2012). waves2Foam 라이브러리에는 파 생성시 조유주파수에 식 (1)과 같이 선속(U_{ship}) 부분이 없기에 이 부분을 추가하였다. 선박의 부가저항을 해석하기 위해 먼저 정수 중 선박의 저항

성능을 해석한 후, 단파($\lambda/L_{pp}=0.65$)에서 장파($\lambda/L_{pp}=1.95$)까지 5개의 파장으로 나누어 상하동요와 종동요 운동 성능과 부가저항을 해석하였다. 계산된 수치해석 결과를 검토하기 위해 Sadat-Hosseini, et al. (2015) 및 2015 Tokyo CFD Workshop 에서 제공한 모형실험 결과와 비교하였다.

2. 대상선의 제원 및 해석 조건

대상선은 선박해양플랜트연구소에서 설계한 3,600TEU 컨테이너선인 KRISO Container Ship(KCS)으로 선정하였다. 선박의 길이는 FORCE Technology 기관에서 수행한 6.07m의 조건과 동일하게 설정하였다 (Sadat-Hosseini, et al., 2015). 또한, KCS에 태(rudder)를 포함하였다.

해석 조건은 Table 1과 같이 정수(Case 0), 단파(Case 1~2), 중파(Case 3), 장파(Case 4~5) 조건으로 분류하였다. 동일한 속도 조건에서 상하동요와 종동요 운동 조건만을 고려하였고 나머지 운동 조건은 모두 구속하였다. 파의 기울기(wave steepness)는 모두 1/60으로 설정하였고, 무한 수심일 때로 가정하였다.

선박이 전진하는 속도와 규칙 파랑으로 발생하는 조유주파수(encounter frequency, f_e)와 조유주기(encounter period, T_e)는 다음과 같이 계산된다.

$$f_e = \sqrt{g/(2\pi\lambda)} + U_{ship}/\lambda \tag{1}$$

$$T_e = 1/f_e \tag{2}$$

여기서, g 는 중력가속도, λ 는 파장, U_{ship} 는 선박의 전진 속도를 의미한다.

Table 1 Simulation conditions in calm water and regular head waves

Case no.	0	1	2	3	4	5
Wave length (λ/L_{pp})	calm water (no waves)	0.65	0.85	1.15	1.37	1.95

3. 수치 모델링

3.1 지배방정식

비압축성 유동에서 속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존방정식과 모멘텀 보존 방정식을 지배방정식으로 사용하였으며 식은 다음과 같이 표현된다 (Jasak, 2009).

$$\nabla \cdot \vec{v}_m = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho_m \overrightarrow{v_m}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \overrightarrow{v_m} \overrightarrow{v_m}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + S \quad (4)$$

여기에서 ρ 는 밀도, \overrightarrow{v} 는 속도벡터, p 는 정압력을 나타낸다. S 는 소스항을 나타내고, 이러한 소스항에는 중력가속도가 포함된다. $\overline{\overline{\tau}}$ 는 점성 응력 텐서를 나타내고 비압축성 유동에서 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu (\nabla \overrightarrow{v_m} + \nabla \overrightarrow{v_m}^T) \quad (5)$$

여기서, 아래첨자 m 은 혼합류를 의미하고 혼합류에서의 밀도(ρ)와 점성계수(μ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \quad (6)$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l \quad (7)$$

여기서, α 는 체적분율을 나타내고, 아래첨자, l 과 v 는 액상과 기상을 의미한다.

난류를 고려하기 위해 운동량 보존 방정식을 시간평균하면 다음과 같이 Reynolds 응력항이 생성된다.

$$-\rho_m \overline{\overline{v_m v_m}} = \mu_t (\nabla \overline{\overline{v_m}} + \nabla \overline{\overline{v_m}}^T) I \quad (8)$$

여기서, μ_t 는 난류점성계수이고, I 는 단위 텐서를 나타낸다.

또한, 아래와 같은 체적비 이송방정식을 고려하여 자유수면을 계산하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha \rho_m \overline{\overline{v_m}}) = -C_{ad} \nabla \cdot (\alpha (1 - \alpha) \overline{\overline{v_r}}) \quad (9)$$

여기서, 체적분율 α 는 액체영역에서 1, 기체영역에서 0, 상호 경계면에서는 $0 < \alpha < 1$ 의 값을 갖는다. 오른쪽 항은 해의 확산을 감소시키기 위한 확산항이다 (Lee & Rhee, 2015; Park, et al., 2016). 여기서 C_{ad} 는 확산 감소를 위한 상수이고 본 논문에서는 파형이 최대한 깨지지 않는 수인 0.8을 사용하였다. $\overline{\overline{v_r}}$ 은 자유수면 경계면에서의 속도를 나타낸다.

3.2 시뮬레이션 조건

직교좌표계를 사용하였다. 선체의 무게중심을 기준으로 선미 방향을 x 축, 좌현방향을 y 축, 높이 방향을 z 축으로 설정하고 해석하였다.

계산에 사용된 격자, 경계조건, 도메인의 크기는 Fig. 1과 같다. 전체 도메인은 직사각형 형태로 구성하였고 선체의 크기를 1L로 표현하였을 때, 선수 앞쪽은 2L, 선미 뒤쪽으로 5L로 설정하였다. 폭은 1L, 수면 위로는 0.5L, 수면 아래는 3L로 설정하였다. 계산의 효율을 위해 선체의 반에 해당되는 도메인으로 계산을 진행하였다.

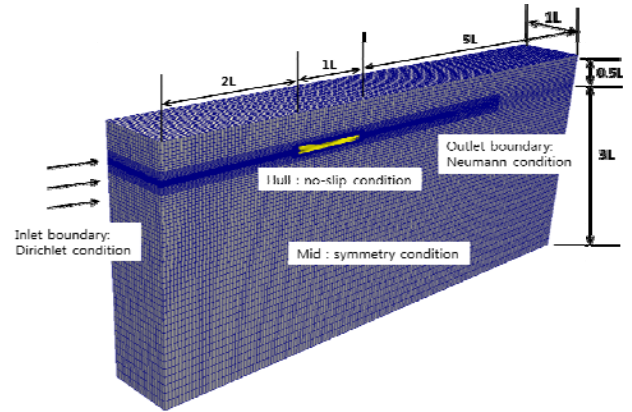


Fig. 1 Mesh, boundary conditions, and domain extent

입구면에서 속도, 난류, 체적비에 대한 경계조건은 Dirichlet 조건, 압력은 Neumann 조건으로 적용하였고, 이와 반대로 출구면에서 속도, 난류, 체적비는 Neumann 조건, 압력은 Dirichlet 조건으로 적용하였다. 물리적으로 $y=0$ 면을 기준으로 대칭이기 때문에 $y=0$ 면에는 symmetry 조건, 선체 표면은 선체의 운동속도를 Dirichlet 조건으로 적용하였다.

OpenFOAM에서 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 blockMesh를 이용하여 전체 도메인에는 정렬 격자로 생성하였다. 그 다음, KCS 주위와 자유수면에 해당되는 격자는 snappyHexMesh를 이용하여 hanging node mesh와 cut cell mesh인 비정렬 격자로 생성하였다. 선체 주위의 부근과 자유수면 근처에 격자를 밀집시켰으며, 출구면으로 이동할수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 총 격자의 수는 약 370만개이고, 선체의 표면격자는 약 3만개를 사용하였다.

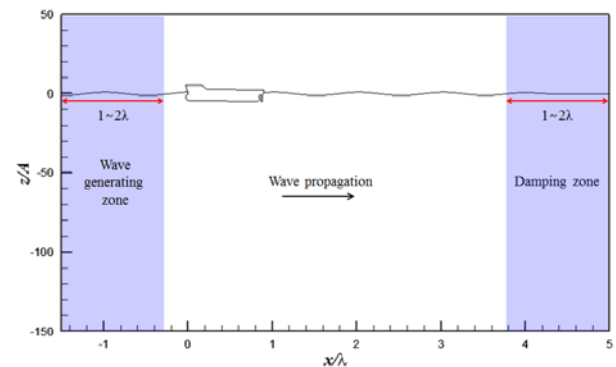


Fig. 2 Simulation domain for wave generating and damping zones

파형을 생성하는 생성 구역(wave generating zone)과 파의 반

사를 방지하고 소멸시키는 감쇄 구역(damping zone)을 설정하여 파를 생성하였다. 생성 구역과 감쇄 구역은 Fig. 2와 같이 설정하였고 파는 왼쪽에서 오른쪽으로 진행한다. 생성 구역과 감쇄 구역의 크기는 단파에 해당되는 영역에서는 모두 2λ 씩, 중파 및 장파에 해당되는 영역에서는 모두 1λ 씩 설정하였다. 입사파는 2차 Stokes 파 이론을 사용하였다. 파의 진행초기, $x/\lambda=0$ 지점에서 파랑의 마루(crest)와 선체의 선수부분이 일치하도록 하여 입사파의 초기위상(initial phase)은 0으로 설정하였다. $x/\lambda=0.513$ 지점에 선체의 무게중심이 위치하며, 파장이 바뀌어도 무게중심은 변하지 않는다.

3.3 수치 방법

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 SIMPLE (Patankar & Spalding, 1972)과 PISO (Issa, 1985)를 결합한 PIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 난류모델은 SST $k-\omega$ 모델 (Menter, 1993)과 벽함수 (Park, et al., 2013)를 사용하였다. 대류 항은 TVD scheme에 vanLeer (Van Leer, 1979) limiter로 차분을 적용하였고, 확산항은 2차 정확도의 중심 차분을 적용하여 계산하였다. 체적비는 하류차분과 상류차분을 혼합한 이산화 방법을 사용하여 계산하였다. 대수방정식의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법 (Weiss, et al., 1999)을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 사용하여 대수방정식을 계산하였다.

3.4 격자 변형 방법

파랑하중에 의한 선체의 움직임을 구현하기 위해서는 격자를 변형시켜야 한다. 전체 도메인 내에서 격자의 변형은 라플라스 기법을 사용하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \vec{u}_p) = 0 \tag{10}$$

$$\gamma = \frac{1}{d^2} \tag{11}$$

여기서, γ 는 확산계수이며 본 논문에서는 식 (11)과 같이 2차 기반의 확산계수를 사용하였다. d 는 움직이고 있는 격자의 셀 중심과 임의의 셀 중심 사이의 거리를 의미한다. \vec{u}_p 는 격자점의 이동 속도를 나타내고 확산계수의 크기에 따라 격자의 이동 속도를 조절한다.

격자점의 이동 속도를 얻은 후 내부 격자점들은 다음과 같은 과정을 통해 변형 된다.

$$\vec{x}_p = \vec{x}_{p0} + \vec{u}_p \Delta t \tag{12}$$

여기에서 \vec{x}_{p0} 는 기존 위치에서의 격자점을 의미하고, \vec{x}_p 는 시간에 따른 변형된 최종 위치에서의 격자점을 의미한다.

4. 부가저항 및 운동응답 해석 방법

4.1 부가저항 해석

정수 중일 때, 선박에 작용하는 전 저항은 선체에 작용하는 힘을 무차원화하여 계산할 수 있다.

$$C_T = \frac{F_{x, calm}}{0.5\rho A U^2} \tag{13}$$

여기에서 $F_{x, calm}$ 은 정수 중 선체의 x-방향으로 작용하는 힘을 나타낸 것이고, ρ 는 밀도, A 는 선체의 표면적, U 는 선박의 속도를 의미한다.

파랑으로 인한 선박의 부가저항은 파랑에 의해 계산된 저항과 정수 중에서 계산된 저항의 차로써 계산된다. 무차원화 된 값은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{aw} = \frac{(F_{x, wave} - F_{x, calm})}{\rho g \zeta_{\Omega}^2 B_{WL}^2 / L_{PP}} \tag{14}$$

여기에서 $F_{x, wave}$ 은 파랑에 의해 계산된 0 번째 조화진폭에 해당되는 힘을 의미하고, g 는 중력 가속도, ζ_{Ω} 은 1 번째 조화진폭에 해당되는 파의 진폭, B_{WL} 은 수선에 해당되는 선체의 넓이, L_{PP} 는 선박의 길이를 의미한다.

4.2 운동응답 해석

파랑으로 인한 선박의 상하동요 및 종동요 응답은 전달함수 (transfer function, TF)를 사용하여 해석할 수 있다.

$$TF_3 = \frac{x_{31}}{\zeta_{\Omega}} \tag{15}$$

$$TF_5 = \frac{x_{51}}{\zeta_{\Omega} k} \tag{16}$$

여기에서 TF_3 , TF_5 는 각각 상하동요 종동요에 대한 전달함수를 의미하고, x_{31} , x_{51} , ζ_{Ω} 은 1 번째 조화진폭에 해당되는 상하동요 응답, 종동요 응답, 파의 진폭을 의미한다. 또한, k 는 파수(wave number)를 의미한다.

5. 해석 결과

5.1 정수 중 결과

정수 중 조건일 때(Case 0), $Fr=0.261$ 의 선속에서 선체에 작용하는 전 저항, sinkage, trim에 대한 계산결과 값을 실험결과 값과 비교하여 Table 2에 나타내었다. sinkage와 trim의 값이 음수인 것은 각각 기존의 위치에서 선체가 가라앉는다는 것과 선수 부분이 선미부분 보다 아래로 기울어진 형태를 의미한다. 계산결과에서 KCS의 경우, 정수 중에서 운항할 때 선체는 가라앉으며 선수 부분이 아래쪽으로 기울어진 상태로 운항하는 것을 확인할 수 있다. Trim에 대한 계산은 설계흘수를 기준으로 선수(δ_b)와 선미(δ_s)의 수직 이동거리를 이용하여 Trim 각도 ($= \tan^{-1}(2|\delta_b + \delta_s|/L_{BP})$)를 계산한다. 전 저항과 sinkage 결과에 대한 비교오차는 5% 이내이며 trim은 2% 이내로 모형실험 결과에 근접한 오차가 발생한 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Result in calm water

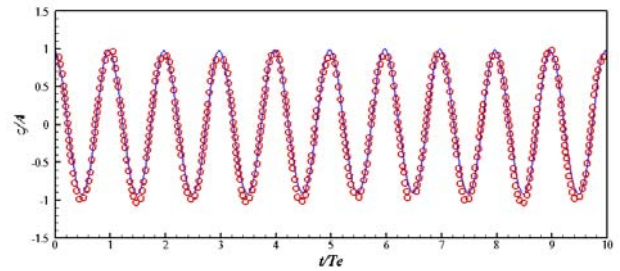
	C_T ($\times 10^{-3}$)	sinkage/ L_{pp} ($\times 10^{-3}$)	trim (deg.)
Present (Case 0)	4.018	-1.989	-0.1676
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	3.835	-2.074	-0.1646
Difference (% of EFD)	-4.757	4.216	-1.845

5.2 파랑의 생성

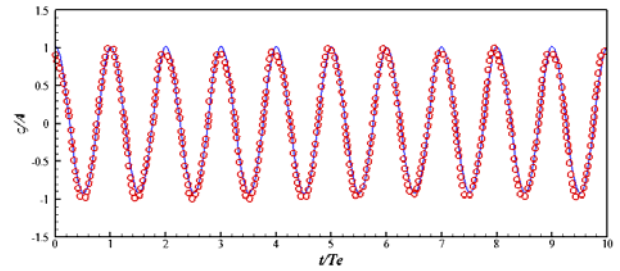
각기 다른 파장에 대한 파랑은 2차 Stokes 파 이론을 사용하여 생성하였다. 모든 파랑에 대해 정확하고 일관된 파랑을 생성하는 것은 부가저항을 해석하는데 중요한 요소로 작용한다. 도메인 내에서 생성된 파랑이 정확하고 일관되게 생성되었는지 검증하기 위해 선박이 없는 자유수면 상태에서 파랑을 생성하였고, 선박의 선수부분과 파랑의 마루가 만나는 지점($x/\lambda=0$)을 기준으로 시간에 따른 파고의 변화를 측정하여 실험 결과와 비교하였다. 실험결과는 <http://www.t2015.nmri.go.jp>에서 확인할 수 있다.

진행되는 파랑의 일반적인 경향성을 판단하기 위해 10주기 동안 진행되는 파고 주기를 출력하였고 실험 결과에 대한 비교 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 파형에 따른 주기는 모든 구간에서 실험 결과와 비슷한 형상으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한, 계산 결과에 대해 푸리에 시리즈를 사용하여 각 파장에 대한 1차 조화진폭의 파고의 값을 모형실험 값과 비교하여 Table 3에 나타내었다. 동일한 격자를 사용하고 있기 때문에 파장이 커질수록 많은 격자가 파장 내에 위치하고 있어 오차가 줄어드는 경향을 보였다. 실험 값 대비 오차는 5%범위 이내에서 만족하고 있으며 수치 방법, 격자의 크기 등이 파장과 파고가 각

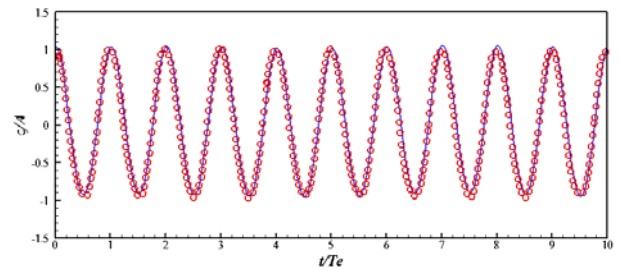
기 다른 파랑들을 비교적 일관되게 생성하는데 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.



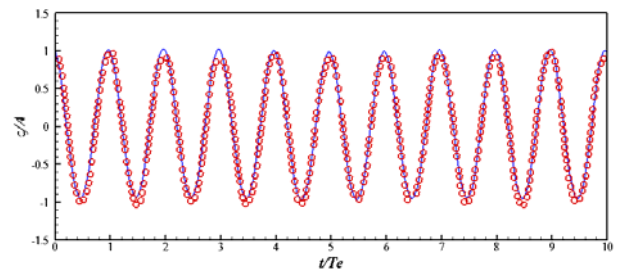
(a) Case 1 ($\lambda/L_{pp}=0.65$)



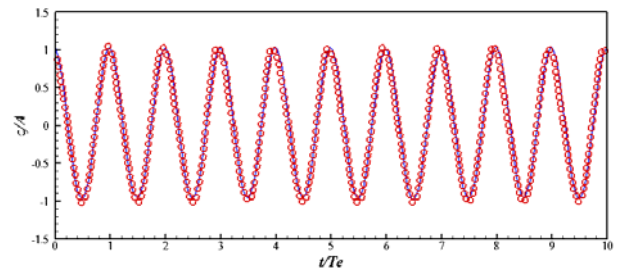
(b) Case 2 ($\lambda/L_{pp}=0.85$)



(c) Case 3 ($\lambda/L_{pp}=1.15$)



(d) Case 4 ($\lambda/L_{pp}=1.37$)



(e) Case 5 ($\lambda/L_{pp}=1.95$)

Fig. 3 Time history of wave elevation in different wave conditions (EFD : symbol, Present : line)

Table 3 1st harmonic wave amplitude in different wave conditions

Case	wave amplitude($\zeta_1/L_{PP} \times 10^3$)				
	1	2	3	4	5
Present	4.883	6.226	10.033	12.169	16.111
EFD (Sadat-Hosseini, et al, 2015)	5.132	6.409	10.152	12.300	16.114
Difference (% of EFD)	4.846	2.849	1.167	1.068	0.044

5.3 파랑에 의한 부가저항 및 운동응답

Fig. 4~6은 파랑에 의한 선박의 전 저항, 상하동요 응답, 종동요 응답에 대한 계산 결과를 실험 결과와 각각 비교한 그래프이다. 10주기 동안 계산된 결과를 실험 결과와 비교하였으며, FORCE Technology 기관에서 제공한 6.07 m KCS 선박에 대한 모형실험 결과를 사용하였다. 모형실험 결과에 대한 정보는 <http://www.t2015.nmri.go.jp>에서 확인할 수 있다 (National Maritime Research Institute, 2015).

단파 영역(Case 1~2)일 때, 종동요 응답 계산 결과는 실험 결과에 비해 진폭이 크고 불규칙하게 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이와 마찬가지로 상하동요 응답 계산 결과는 실험 결과보다 다소 차이를 보이며 진동한다. 그러나 중장파 영역(Case 3~5)일 때의 상하동요와 종동요 응답은 실험 결과와 대부분 일치하는 것을 확인할 수 있고, 진동 폭이 일정하게 유지되며 진행되는 것을 알 수 있다. 선박에 작용하는 전 저항은 이와 달리 모

든 파랑에 대해 실험 결과의 진동 폭이 계산 결과보다 크고 한 주기에 대해 불규칙하게 진동하는 것을 보여주는 반면, 계산 결과는 실험 결과보다 작은 진폭으로 진동을 하고 비교적 규칙적으로 진동하는 것을 확인할 수 있다.

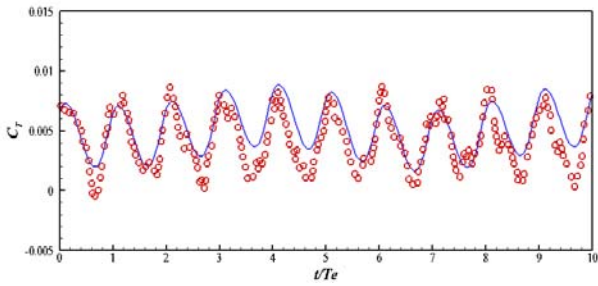
Table 4, 5는 계산한 수치해석 결과를 바탕으로 실험과의 정량적인 비교를 위해 각 파장별 선체에 작용하는 전 저항과 부가저항, 전달함수로 나타낸 운동응답에 대한 결과 값을 실험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 부가저항 및 종동요의 결과가 전 저항과 상하동요의 오차보다 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 단파영역(Case 1~2)에 대한 오차가 상대적으로 다른 영역보다 크다. 이와 같은 이유는 Fig. 4~6의 단파영역에서 수치해석 결과와 실험 결과와의 차이가 크기 때문이다. 전 저항 결과만으로 분석하였을 때, 파장 별 전 저항 오차는 실험 값 대비 9% 이내로 발생한다. 그러나 부가저항의 오차는 전 저항 오차보다 큰 것으로 나타나는데, 이러한 이유는 전 저항 오차에 추가적으로 정수 중 저항의 오차 및 첫 번째 조화 파고의 오차가 복합적인 요소로 작용하여 부가저항의 오차가 증가한 것으로 판단된다. 종동요 전달함수의 오차 값은 단파영역에서 실험 결과와 많은 차이를 보이는데, 이 조건에서 종동요 전달함수의 크기는 매우 작은 값이기 때문에 수치적으로 실험결과에 약간만 벗어나더라도 큰 오차를 유발하여 다른 영역보다 수치적으로 크게 나온 것으로 판단된다. Case 3에 대한 부가저항의 불확실성은 31.9%로 계산되었으며, 불확실성이 종동요 값에 대한 실험과의 차이를 유발한 것으로 판단된다. 단파에서의 모형시험과의 차이는 불확실성 (Seo, et al., 2016)외에 VOF 방법에서의 수치해 확산 (Lee & Rhee, 2015), 수치방법의 불확실성 (Seo, et al., 2016), 출구면에서의 반사파의 영향, 초기조건 및 계산방법(모든 계산영역에 파를 분포시킨 후 파를 전파시킴) 등으로 유발된다고 판단된다.

Table 4 CT and added resistance coefficient in difference wave conditions

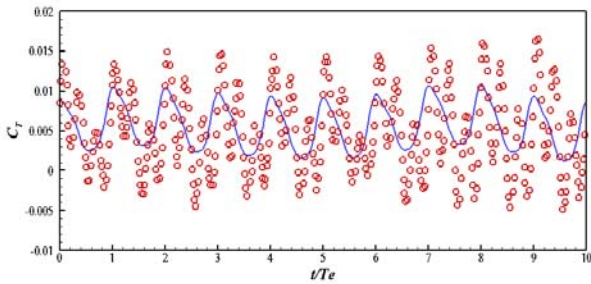
Case	$C_T (\times 10^3)$					σ_{aw}				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Present	4.379	5.036	7.451	7.559	5.514	4.803	8.320	10.807	7.577	1.828
EFD (Sadat-Hosseini, et al, 2015)	4.127	4.622	7.078	6.977	5.421	3.386	6.102	9.911	6.512	1.909
Difference (% of EFD)	-6.120	-8.944	-5.271	-8.335	-1.725	-41.853	-36.353	-9.042	-16.348	4.252

Table 5 Transfer functions of heave and pitch motions in difference wave conditions

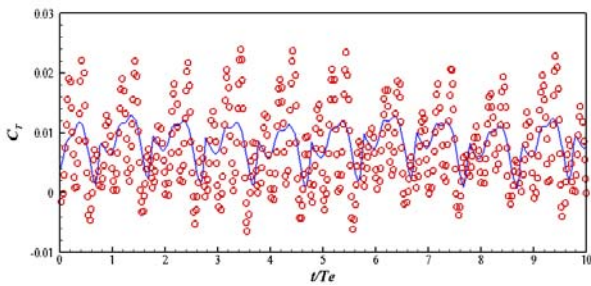
Case	TF_3					TF_5				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Present	0.117	0.242	0.901	0.899	0.890	0.010	0.225	0.724	0.971	1.067
EFD (Sadat-Hosseini, et al, 2015)	0.130	0.241	0.899	0.875	0.933	0.017	0.146	0.748	0.966	1.119
Difference (% of EFD)	9.936	-0.446	-0.242	-2.760	4.615	42.000	-53.573	3.294	-0.578	4.652



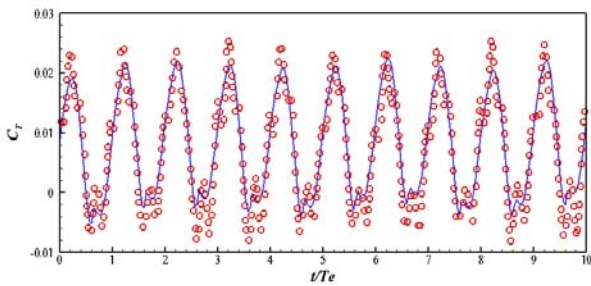
(a) Case 1 ($\lambda/L_{pp}=0.65$)



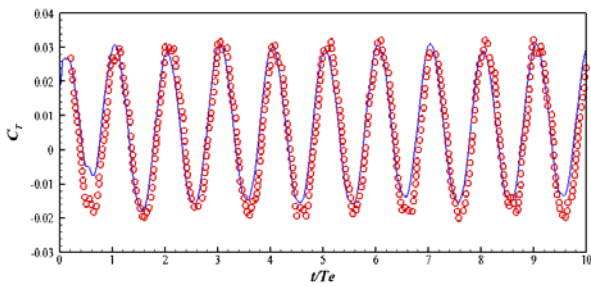
(b) Case 2 ($\lambda/L_{pp}=0.85$)



(c) Case 3 ($\lambda/L_{pp}=1.15$)

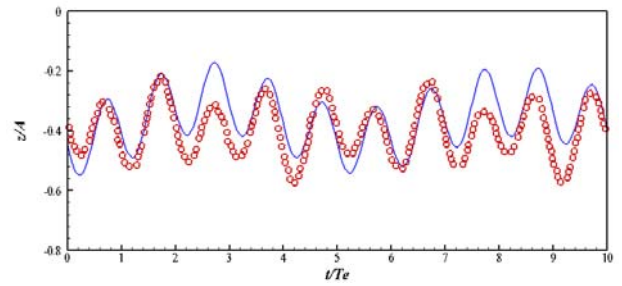


(d) Case 4 ($\lambda/L_{pp}=1.37$)

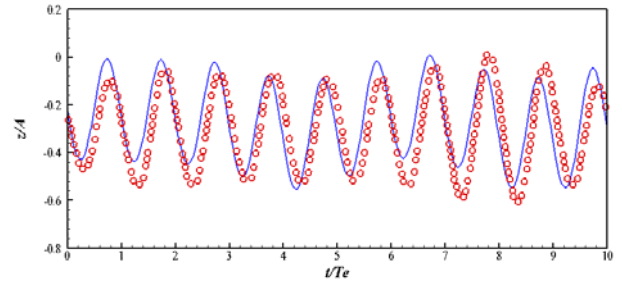


(e) Case 5 ($\lambda/L_{pp}=1.95$)

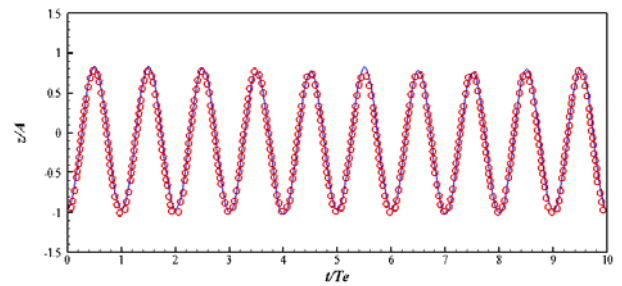
Fig. 4 Time history for CT in different wave conditions (EFD : symbol, Present : line)



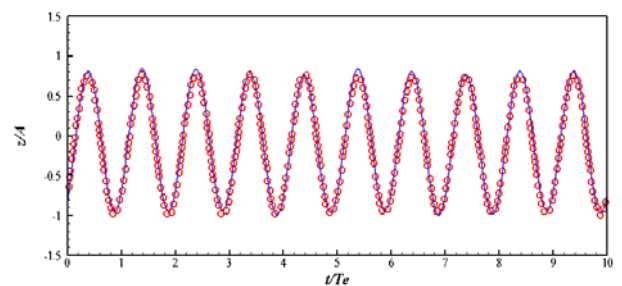
(a) Case 1 ($\lambda/L_{pp}=0.65$)



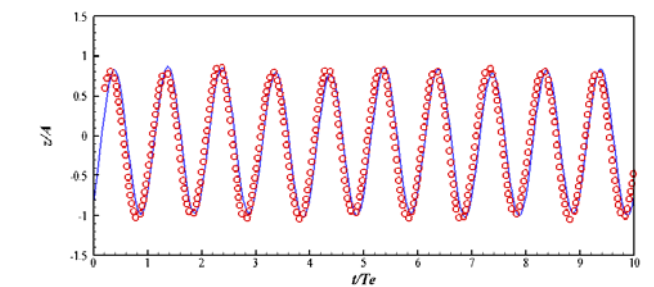
(b) Case 2 ($\lambda/L_{pp}=0.85$)



(c) Case 3 ($\lambda/L_{pp}=1.15$)

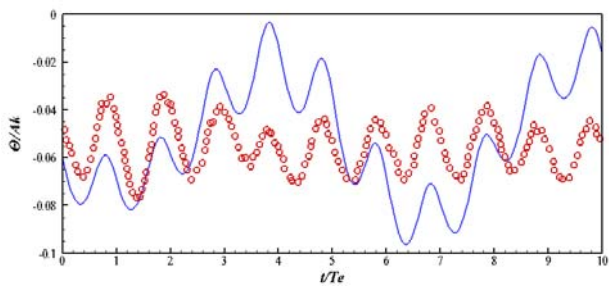


(d) Case 4 ($\lambda/L_{pp}=1.37$)

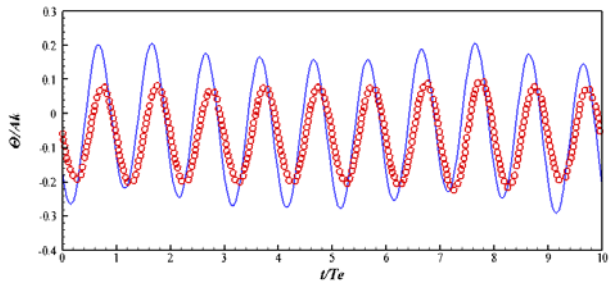


(e) Case 5 ($\lambda/L_{pp}=1.95$)

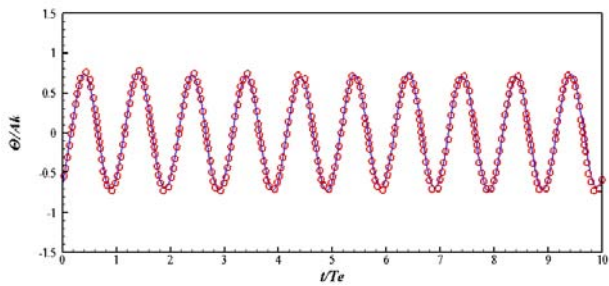
Fig. 5 Time history for heave motion in different wave conditions (EFD : symbol, Present : line)



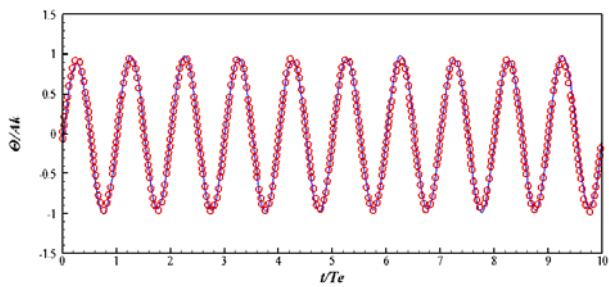
(a) Case 1 ($\lambda/L_{pp}=0.65$)



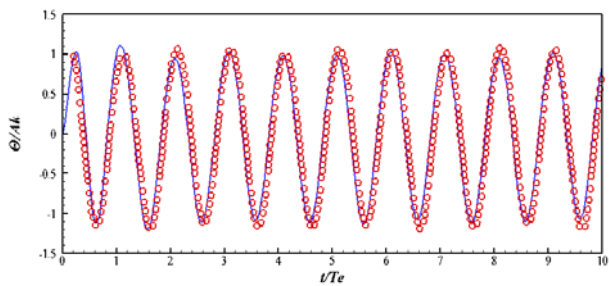
(b) Case 2 ($\lambda/L_{pp}=0.85$)



(c) Case 3 ($\lambda/L_{pp}=1.15$)

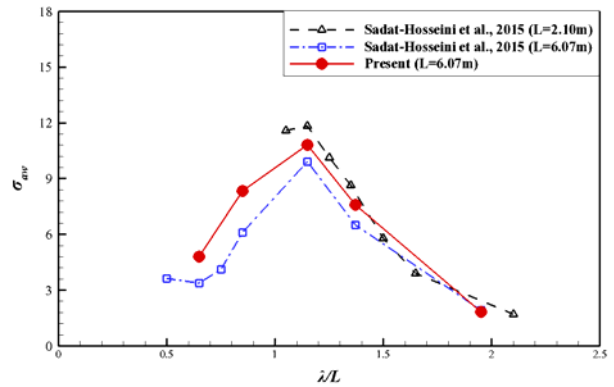


(d) Case 4 ($\lambda/L_{pp}=1.37$)

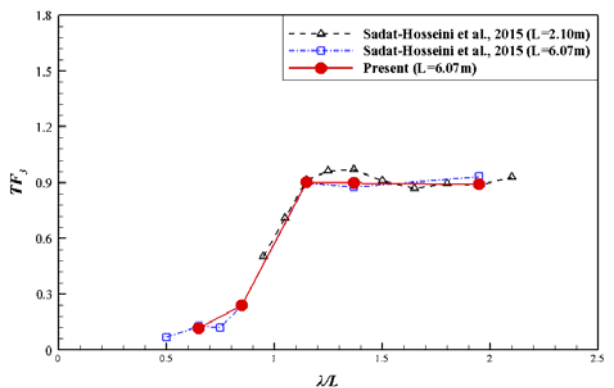


(e) Case 5 ($\lambda/L_{pp}=1.95$)

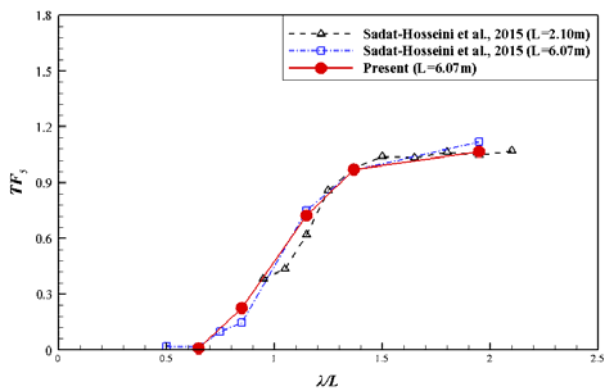
Fig. 6 Time history for pitch motion in different wave conditions (EFD : symbol, Present : line)



(a) Added resistance coefficient



(b) Heave motion



(c) Pitch motion

Fig. 7 Results of added resistance coefficient, transfer functions of heave and pitch motions in different wave conditions

Fig. 7은 부가저항 및 운동응답에 대한 전달함수의 크기를 파장별로 나타낸 그래프이다. 동일한 크기인 6.07 m KCS 모형실험 결과 이외에도 2.10 m KCS 모형실험 결과 (Sadat-Hosseini, et al., 2015)도 함께 표기하였다. 부가저항의 수치해석 결과는 대부분 동일한 크기의 모형실험 결과보다 상대적으로 높은 값으로 형성되어 있지만 다른 크기의 모형실험 결과와 비교하였을 때 모형실험 결과 범주 내에 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 상하동요 및 종동요의 전달함수 수치해석 결과는 동일한 크기의 모

형실험 결과와 대부분 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. Figs. 3~5의 전 저항 그래프와 단파영역에서 상하동요와 종동요 응답 그래프는 실험 결과와 차이를 보이지만, 크기를 파장별로 나타내면 실험과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 부가저항을 해석하기 위해서는 크기를 파장별로 보는 것도 중요하지만 정확한 해석을 위해서는 시간에 따른 변화를 볼 필요가 있다.

Fig. 8은 대표적으로 단파영역인 Case 1과 장파영역인 Case 5에서 선수와 파랑의 마루가 만나는 지점($t/T_e=0$)일 때의 파형을 도식화한 것이다. 단파에서는 파가 크지 않기 때문에 파의 영향을 많이 받지 않아 정수중과 유사한 분포를 보이는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 장파에서는 선박이 파고에 맞추어 운동을 하기 때문에 선체로 인해 발생하는 파보다는 입사파의 형태가 주된 것을 볼 수 있다.

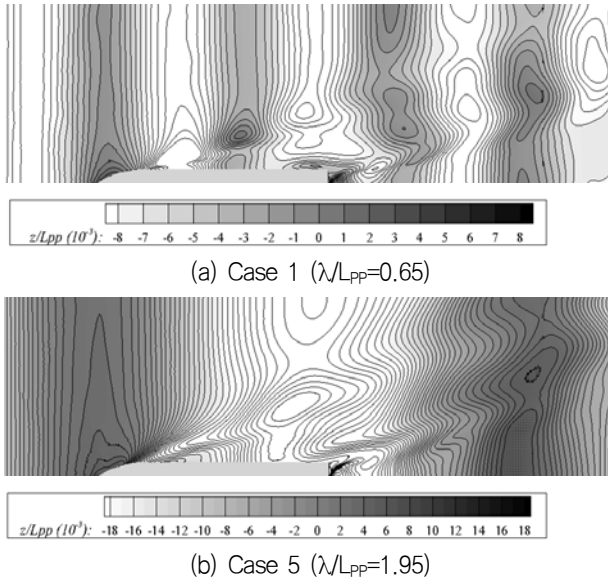


Fig. 8 The wave pattern around hull at $t/T_e=0$

6. 결론

본 연구에서는 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 선수 규칙파 중 KCS 선형의 부가저항 및 운동성능을 해석하였다. 5가지 파랑에 대해 단파 및 중·장파영역으로 나누고, 파고와 파장이 각기 다른 파형을 비교적 일관되게 생성할 수 있는 격자와 수치방법을 찾은 후 실험 결과와 비교하였다. 또한, 각 파장에 대한 부가저항과 운동응답 계산 결과를 모형실험 결과와 비교하였다.

수치해석 결과를 모형실험 결과와 비교해보면, 파랑의 생성은 실험 결과 대비 5% 이내의 오차로 비교적 일관되게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 각 파랑에 대한 선체의 전 저항 결과 및 단파영역에서 상하동요와 종동요 응답 결과 그래프는 실험 결과 그래프와 다소 차이를 보이며 진동한다. 그러나 푸리에 시리즈를 이용하여 계산된 수치해석의 결과를 비교해볼 때, 선박에 작용하는 선박에 작용하는 전 저항과 상하동요 응답은 10% 이내로 형성되

어 결과와 대체적으로 비슷한 것을 알 수 있다. 부가저항 결과는 Case 1에서 41.85%의 최대 오차가 발생하였고, Case 5에서 4.25%의 최저 오차가 발생하였다. 전달함수로 나타낸 상하동요는 실험결과와 비슷하며, 종동요의 결과는 단파영역에서 최대 53.57%의 최대 오차가 발생하며 다소 큰 차이를 보인다.

향후, 특정한 주기를 가진 경사 파(oblique wave)에서 선박에 작용하는 부가저항과 운동응답에 대해 수치해석 검증할 예정이다.

후기

이 논문은 미래창조과학부 “신진연구지원사업(2015037577)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Arribas, F.P., 2007. Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves. *Ocean Engineering*, 34, pp.946–955.
- Faltinsen, O.M. Minsaas, K.J. Liapis, N. & Skjördal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *Proceeding of the 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 6–10 October 1980, pp.505–529.
- Fujii, H. & Takahashi, T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves. *Proceeding of the 14th ITTC*, Ottawa, Canada, 2–11 September 1975, pp.351–360.
- Gerritsma, J. & Beukelman, W., 1972. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. *International Shipbuilding Progress*, 19(217), pp.285–293.
- Issa, R.I., 1985. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator–splitting. *Journal of Computational Physics*. 62, pp.40–65.
- 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(9), pp.1073–1088.
- Jasak, H., 2009. OpenFOAM: Open source CFD in research and industry. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1(2), pp.89–94.
- Joncquez, S.A.G. Bingham, H.B. Andersen, P. & Kring, B., 2008. Validation of added resistance computations by a potential–flow boundary–element method. *Proceeding of the 27th Symposium on*

- Naval Hydrodynamics*. Seoul, Korea, 5–10 October 2008, pp.1461–1470.
- Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and calculations on 4 wigley hull forms in head waves*. Delft university of technology report No 0909. Delft: Delft University.
- Kim, K.H. & Kim, Y., 2011. Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method. *Ocean Engineering*, 38, pp.1357–1367.
- Lee, H. & Rhee, S.H., 2015. A dynamic interface compression method for VOF simulations of high-speed planing watercraft. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(5), pp.1849–1857.
- Menter, F.R., 1993. Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows. in *Proceedings of the 24th Fluid Dynamics Conference*, Orlando, Florida, 6–9 July 1993, AIAA Paper 93–2906.
- Nakamura, S. & Naito, S., 1977. Propulsive performance of a container ship in waves. *The Society of Naval Architects of Japan*, 15, pp.24–48.
- National Maritime Research Institute, 2015. *Tokyo 2015 A workshop on CFD in ship hydrodynamics*. [Online] (Updated 1 August 2016) Available at: <http://www.t2015.nmri.go.jp> [Accessed 18 October 2016].
- Oh, S. Yang, J. & Park S.-H., 2015. Computational and experimental studies on added resistance of AFRAMAX-class tankers in head seas. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.471–477.
- Orihara, H. & Miyata, H., 2003. Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system. *Journal of Marine Science and Technology*, 8, pp.47–60.
- Park, D.M. Lee, J. & Kim, Y., 2015. Uncertainty analysis for added resistance experiment of KVLCC2 ship. *Ocean Engineering*, 95, pp.143–156.
- Park, I.R. Kim, J. Kim, Y.-C. Kim, K.-S. Van, S.-H. & Suh, S.-B., 2013. Numerical prediction of ship motions in wave using RANS method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(4), pp.232–239.
- Park, S. Park, S.W. Rhee, S.H. Lee, S.B. Choi, J.-E. & Kang, S.H., 2013. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5, pp.33–46.
- Park, S. Lee, H. & Rhee, S.H., 2016. Numerical Investigation of anti-diffusion source term for free-surface wave flow. *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, 2(2), pp.48–60.
- Patankar, S.V. & Spalding, D.B., 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, pp.1787–1806.
- Sadat-Hosseini, H. Wu, P.C. Carrica, P.M. Kim, H. Toda, Y. & Stern, F., 2013. CFD verification and validation of added resistance and motions of KVLCC2 with fixed and free surge in short and long head waves. *Ocean Engineering*, 59, pp.240–273.
- Sadat-Hosseini, H. Toxopeus, S. Kim, D.H. Castiglione, T. Sanada, Y. Stocker, M. Simonsen, C. Otzen, J.F. Toda, Y. & Stern, F., 2015. Experiments and computations for KCS added resistance for variable heading. *Proceeding of the 5th World Maritime Technology Conference*, Providence, RI, 3–7 November 2015.
- Sato, Y. Miyata, H & Sato, T., 1999. CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves: application to an advancing ship in regular heading waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 4, pp.108–116.
- Seo, M-G. Park, D-M. Yang, K-K. & Kim, Y., 2013. Comparative study on computation of ship added resistance in waves. *Ocean Engineering*, 73, pp.1–15.
- Seo, S. Song, S. & Park, S., 2016. A Study on CFD Uncertainty analysis and its application to ship resistance performance using open source libraries. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), pp.338–344.
- Simonsen, C.D. Otzen, J.F. Joncquez, S. & Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head wave. *Journal of Marine Science and Technology*, 18, pp.435–459.
- Shen, Z. Wan, D. & Carrica, P.M., 2015. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. *Ocean Engineering*, 108, pp.287–306.
- Storm-Tejsten, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D., 1973.

Added resistance in waves. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 81, pp.250–279.

Tezdogan, T. Demirel, Y.K. Kellett, P. Khorasanchi, M. Incecik, A. & Turan, O., 2015. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming. *Ocean Engineering*, 97, pp.186–206.

Van Leer, B., 1979. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to godunov's method. *Journal of Computational Physics*, 32(1), pp.101–136.

Vukcevic, V. Jasak, H. & Malenica, S., 2016a. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part I: Computational method. *Ocean Engineering*, 121, pp.37–46.

Vukcevic, V. Jasak, H. & Malenica, S., 2016b. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part II: Verification and validation. *Ocean Engineering*, 121, pp.76–88.

Weiss, J.M. Maruszewski, J.P. & Smith, W.A., 1999. Implicit solution of preconditioned navier–stokes equations using algebraic multigrid. *AIAA Journal*, 37(1), pp.29–36.

