

동적 중첩격자 기법을 이용한 KVLCC2의 파랑중 부가저항 및 2자유도 운동 해석

김유철·김윤식·김진·김광수[†]
선박해양플랜트연구소(KRISO)

Added Resistance and 2DOF Motion Analysis of KVLCC2 in Regular Head Waves using Dynamic Overset Scheme

Yoo-Chul Kim·Yoonsik Kim·Jin Kim·Kwang-Soo Kim[†]
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

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.

In this study, the analysis of 2DOF (2 Degree Of Freedom) motion and added resistance of a ship in regular head waves is carried out using RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) approach. In order to improve the accuracy for large amplitude motions, the dynamic overset scheme is adopted. One of the dynamic overset schemes, Suggar++ is applied to WAVIS which is the in-house RANS code of KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering). The grid convergence test is carried out using the present scheme before the analysis. The target hull form is KRISO VLCC tanker (KVLCC2) and 13 wave length conditions are applied. The present scheme shows the improved results comparing with the results of WAVIS2 in the non-inertial reference frame. The dynamic overset scheme is confirmed to give the comparatively better results for the large amplitude motion cases than the non-inertial frame based scheme.

Keywords : Added resistance in waves(파랑중 부가저항), Dynamic overset scheme(동적 중첩격자 기법), WAVIS(WAVIS), 2DOF motion analysis(2자유도 운동 해석)

1. 서론

2015년 IMO(International Maritime Organization)의 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 지수의 규제 적용이 시작되면서 선박 설계에 있어서 파랑중 부가저항에 대한 관심이 산업계와 학계 등 관련분야에서 꾸준히 높아지고 있으며, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 파랑중 부가저항은 EEDI 지수의 날씨보정 계수와 관련이 있으며, 실제 해상에서 선박이 운행할 때, 파도에 의해 부가되는 저항 성분으로 선박의 실제 운항 효율에 영향을 미치는 성분이다.

선박의 파랑중 부가저항을 예측하기 위한 방법으로는 실험적 방법과 수치 해석을 통한 방법으로 나눌 수 있다. 실험적 방법으로 1973년 Storm-Tejse et al. (1973)이 Series 60 선형에 대한 부가저항 실험을 시작으로, Journee (1992)의 Wigley 선형 실험, Hirota et al. (2004)의 Ax-bow와 Leadge-bow 효과 실험, Kuroda et al. (2012)의 STEP을 부착한 고속선형의 부가저항 실

험 등이 있었으며, 최근에는 HSVA 모델에 대한 Valanto and Hong (2015)의 연구, Park et al. (2015)의 ITTC 방법을 이용한 KVLCC2의 부가저항 불확실성 해석 등으로 이어지고 있다. 수치 해석을 이용한 방법으로는 크게 포텐셜 이론을 적용한 방법과 Navier-Stokes 방정식을 이용하는 Computational Fluid Dynamics(CFD) 방법으로 나눌 수 있다. 전통적으로 방사파(radiation wave)의 영향을 잘 예측할 수 있는 포텐셜 기반의 방법들이 많이 사용되어 왔으며, 최근에는 컴퓨팅 기술의 발전에 따른 수치유체역학 기법의 비약적인 발전에 힘입어 CFD를 이용한 파랑중 부가저항 해석의 시도가 많이 이루어지고 있다. 포텐셜 기법을 이용한 방법으로는 Salvesen (1978)과 Faltinsen et al. (1980)이 압력 직접적분법(near-field method)을 소개하였으며, Maruo (1960)와 Gerritsma and Beukelman (1972)이 모멘텀 보존법(far-field method)을 제안한 바 있다. 최근에는 Joncquez et al. (2008)이 BEM(Boundary Element Method)을 이용하여 Wigley, Series 60, 벌크선의 부가저항 계산을 소개하였고, Kim and Kim (2011)이 시간영역 3차원 Rankine 패널법의

실용적인 해석을 위한 기준을 제시하였다. 또한 Seo et al. (2013; 2014)은 스트립법, Rankine 패널법과 Euler 방정식에 기반한 직교좌표계법의 비교를 수행한 바 있다. CFD 해석법으로는, Orihara and Miyata (2003)가 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 기반의 해석 프로그램 WISDAM-X를 이용하여 SR108 컨테이너선과 증속도의 탱커에 대한 파랑중 부가저항을 계산하였으며, Carrica et al. (2007)과 Castiglione et al. (2009)은 DTMB 5512의 6자유도 운동 해석, DELFT 372 카타미란의 부가저항 해석을 동적 중첩격자 기법을 활용하여 수행하였다. Simonsen et al. (2013)과 Tezdogan et al. (2015)는 선수파 조건인 KCS의 운동 해석을 수행한 바 있으며, Seo and Park (2017)이 OpenFOAM을 이용한 KCS의 규칙파중 운동 해석을 소개하였다.

본 연구에서는 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 in-house 코드인 WAVIS2에 동적 중첩격자 기법을 적용하여 KVLCC2 선형의 규칙파 중 2자유도 운동과 부가저항 해석을 수행하였다. 다중블록 격자(multi-block mesh)를 이용한 비관성 좌표계(non-inertial reference frame)에서의 기존 계산 결과 (Kim et al., 2017)와의 비교를 통하여 선박 운동 해석에 있어서 동적 중첩격자계가 갖는 장점에 대하여 소개한다.

2. 수치 기법

2.1 지배방정식

본 연구는 RANS 기반의 CFD 코드인 WAVIS2에 선수 규칙파 조건을 적용하여 계산을 수행하였다. 자세한 수치기법 내용은 참고문헌 (Kim et al., 2005; Kim et al., 2010; Kim et al., 2011)에 수록되어 있다. 지배방정식은 연속방정식(continuity equations)과 모멘텀 보존을 위한 RANS 방정식을 사용하며, 정규격자 상에서의 이산화 기법으로 유한체적법(Finite Volume Method)과 자유표면 계산을 위하여 two-phase level-set 기법을 적용한다.

모든 변수는 선속 U_∞ 와 모형선의 수선간 길이(L_{PP}), 그리고 밀도(ρ)로 무차원화 하여 사용한다. 비정상 RANS 방정식은 다음의 적분형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho u_i n_i dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i u_j dS = \int_S \tau_{ij} n_j dS + \int_{\Omega} \rho b_i d\Omega \quad (2)$$

여기서, ρ 는 무차원화 된 물과 공기의 혼합 밀도를 의미하며, 응력텐서 τ_{ij} 는 난류 점성을 포함하고 있다. b_i 는 외력항(body force term)을 나타낸다. Ω 와 S 는 각각 체적과 표면적분을 의미

하며, u 는 속도, n 은 법선벡터를 나타낸다. 시간 적분을 위해 Euler implicit 방법을 적용하며, 대류항은 3차의 MUSCL 방법을, 확산항은 2차의 중심차분법(Central difference scheme)을 사용하였다. 속도-압력 연성을 위해 SIMPLE법이 적용되었고, 난류 모델로는 realizable k-epsilon 방법을 사용하였다.

입사파는 식 (3)과 같이 선형파 이론을 적용하여 생성하여 계산 영역에 더해지며, 선체와 파가 조우하는 조우 주파수(encountered frequency)는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\zeta(x, y, t) = A \cos(k_w x - 2\pi f t) \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{Fn \sqrt{2\pi\lambda}} \quad (4)$$

여기서 A 는 입사파의 진폭(amplitude), k_w 는 파수(wave number), λ 는 파장(wave length), Fn 은 Froude 수를 의미한다.

선체의 운동은 전후동요고정(surge-fixed)으로 가정하고 선수파 상태에서 상하동요(heave motion)와 종동요(pitch motion)만을 고려한 다음의 2자유도 운동 방정식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= M_y / I_{yy} \\ \dot{w} &= F_z / m - g \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \dot{q} 는 종동요 가속도, \dot{w} 는 상하동요 가속도를 의미하며, m 은 질량, I_{yy} 는 관성모멘트, g 는 중력가속도를 나타낸다. M_y 와 F_z 는 유체동역학적 모멘트와 힘으로 유동 해석을 통해 얻어진 값을 사용한다. 이렇게 구해진 가속도를 이용하여 운동 변위를 계산하는 것은 1차 정도의 Euler법을 이용하였다.

2.2 중첩격자 기법

중첩격자계(overset grid system)는 일반적으로 프로펠러, 러더 등을 포함한 선체주위 유동과 같이 상대운동이 있는 유동장 해석이나, 형상이 매우 복잡하거나 부가물 등이 부착되어 있어 단순한 형태의 격자를 생성하기 곤란하거나, 양질의 격자를 생성하기 어려운 경우에 주로 활용된다.

일반적으로 사용되는 다중블록 격자계(multi-block grid system)는 인접한 블록과 공유하는 경계에서 동일한 점을 유지하기 때문에 격자 간 자료 전달 과정에서 별도의 변환, 내삽 등의 과정을 거치지 않고 직접 전달함으로써 해의 정확도를 유지할 수 있는 장점이 있으나, 특정부분에만 격자점을 밀집시키거나 격자 분포를 유연하게 조정하기 어려운 단점이 있고, 물체가 운동하는 경우에는 매 시간간격마다 격자를 재생성하거나, 비관성 좌표계를 활용하는 수밖에 없다. 격자 재생성 방법은 복잡한 3차원 형상에 적용하기 곤란하며, 비관성 좌표계를 이용하면 운동 변위가 큰 경우에 적용하는데 실용적 한계가 있다. 중첩격자계를 이용하는 해석에서는 운동을 하는 내부 격자와 고정된 배경격자가 중첩

된 형태를 갖고 있으며, 각 격자간의 정보들이 영역연결정보(DCI: Domain Connectivity Information)를 통해서 전달된다. 중첩격자간의 보간(interpolation)은 tri-linear 방법을 사용한다. 유동해석코드는 다중블록격자를 이용한 해석 때와 동일하다. 다만, 각 격자점의 위치에 따라, 그에 해당하는 항들을 활성화, 비활성화 되도록 설정하여 계산한다. 식 (6)에서와 같이 일반적인 차분화된 지배방정식의 형태에 활성화-비활성화를 위한 변수 i_b 를 이용하여 표현한다.

$$i_{b,p}A_p\phi_p + \sum_l i_{bl}A_l\phi_l = i_{b,p}Q_p \quad (6)$$

여기서 i_b 는 정상점에서는 1의 값을, 중첩되어 계산에 필요 없는 점(hole, fringe points)에서는 0의 값을 갖게 된다. DCI 데이터를 계산하는 방법은 매우 복잡하며, 이에 대한 연구는 1980년대부터 계속되어 오고 있다. 이에 대한 자세한 설명은 본 연구의 범위에 벗어나는 내용이므로 생략한다. 대표적인 프로그램들이 Suggar++ (Noack, 2009), Pegasus (Suhs et al., 2002) 등을 들 수 있으며, 본 연구에서는 Suggar++를 사용하였다. Fig. 1은 WAVIS에 Suggar++를 접목하여 선체의 운동을 해석하기 위한 흐름도를 보인다. 먼저 격자생성을 수행하고, Suggar++를 이용하여 중첩된 격자의 DCI 정보를 계산한 후, WAVIS에서 유동 해석을 수행한다. 계산된 운동 변위를 고려하여 동적 격자의 위치를 갱신하고 갱신된 위치 정보를 이용하여 Suggar++가 새로운 DCI 정보를 계산하는 과정을 시간 전진하며 수행하는 방식이다.

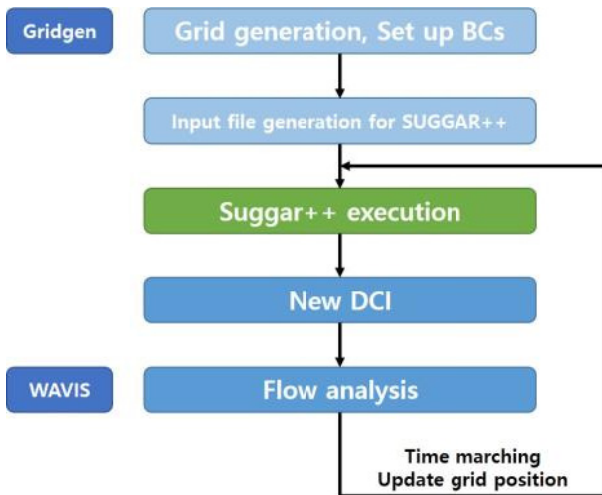


Fig. 1 Flow chart of flow analysis using Suggar++

3. 중첩격자계 구성 및 경계 조건

일반적인 다중블록 격자계와는 달리 중첩격자계는 움직이는 격자계(내부 격자)와 고정된 격자계(배경 격자)를 독립적으로 구성할 수 있다. 즉, 운동을 하는 선체 주위의 격자와 파랑을 표현

하기 위한 배경 격자를 중첩하여 구성한다. Fig. 2는 중첩격자계의 구성을 보인다. 이러한 구성은 선체 운동의 변위가 일정 범위 커지더라도 고정된 배경 격자를 이용하여 자유 표면을 표현하기 위한 양질의 격자 상태를 유지할 수 있는 장점이 있다.

경계조건으로는 $x/Lpp = \min$ 에 파랑 유입류 조건으로 선형파 이론을 적용한 파랑 조건(식 (3))을 설정하고, $z/Lpp = \min, \max$, $x/Lpp = \max$ 와 $y/Lpp = \max$ 에 far-field 경계조건, $y/Lpp = 0$ 에 symmetry 조건을 설정하였다. Fig. 2에서와 같이 선수 앞쪽으로 정의한 파랑 조건이 잘 구현될 수 있도록 일정 두께의 wave prescribed zone을 설정하였으며, far-field에서는 경계면에서 반사파가 해에 영향을 주는 것을 막기 위하여 소파 영역(wave damping zone)을 부과하였다 (Park et al., 2013).

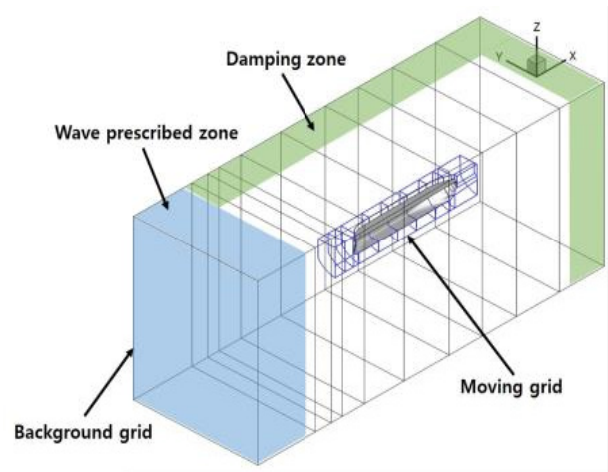


Fig. 2 Overset grid system of KVLCC2

4. 수치 기법 검증

4.1 중첩격자계를 이용한 선형파 진행 문제 계산

입사하는 선형파가 중첩격자를 통해서 잘 전달되는지 확인하기 위하여 Fig. 3과 같은 격자 시스템에서 테스트를 수행하였다. 배경 격자(background grid)의 범위는 $0.0 < x < 4.0$, $-0.2 < y < 0.2$, $-1.0 < z < 0.165$ 로 설정하였으며, 내부 격자(inner grid)는 $1.5 < x < 2.5$, $-0.08 < y < 0.08$, $-0.2 < z < 0.05$ 로 구성하였다. 입사파의 조건은 파장이 1.0, 진폭이 0.004이며, Froude수는 0.25, 이때의 Reynolds 수는 4×10^6 이다. Fig. 4는 파가 진행하였을 때, 입력으로 설정한 선형파와 계산된 자유표면의 비교를 보이고 있다. 점선으로 표시한 것이 선형파의 해석해이며, 실선이 계산된 자유표면을 나타낸다. 후류 쪽으로 진행하면서 약간의 확산이 보이지만, 내부 격자가 위치한 부분에서는 진폭의 해석해와 차이는 1% 내외로 좋은 일치치를 보이고 있다. 따라서 중첩격자 시스템에서 선형파의 적용에는 무리가 없음을 확인할 수 있다.

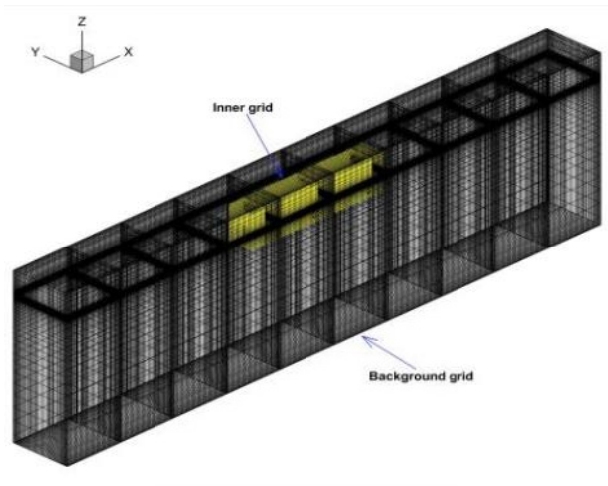


Fig. 3 Overset grid system for the progressing wave case

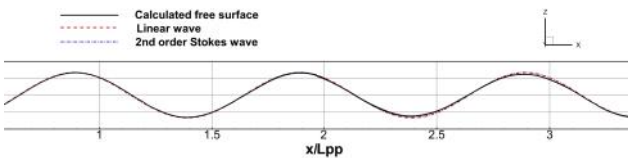


Fig. 4 Comparison between the computed wave elevation and linear wave and 2nd order Stokes wave

4.2 격자 수렴성 테스트

CFD 기법의 V&V(Verification & Validation)는 2005년에 Stern et al. (2005)이 제안한 바 있다. 다중블록 정규격자의 경우, 각 방향별로 격자수를 일정 비율로 설정하여 3가지(coarse, medium, fine) 이상의 격자계를 구성하고, 계산된 결과와 실험 결과와의 비교를 통해서 사용된 수치 기법의 타당성을 해석적으로 검증하는 방법이다. WAVIS2의 파랑중 계산에 대한 V&V 해석은 Kim et al. (2017)에 수행된 바 있으며, 총저항 계수(C_T)에 대하여 그 타당성을 검증하였다. 따라서 본 연구에서는 배경 격자는 하나로 고정하고, 선체 주위의 격자인 내부 격자를 coarse, medium, fine 격자로 구성하고, 하나의 파장에 대한 결과를 이용하여 해의 수렴성을 검증하였다. 내부 격자의 수 조절을 위한 비율은 $\sqrt{2}$ 정도로 설정하였으며, 구성된 내부 격자의 비교를 Fig. 5에 보인다. 각각의 격자수는 coarse가 약 26만개, medium이 약 77만개, fine이 약 150만개이다.

수렴성 검증을 위한 파 조건은 $\lambda/Lpp = 0.5$, $A/Lpp = 0.004821$ 이며, 계산 조건은 모두 동일하다. Fig. 6은 수렴된 상태의 총저항계수와 종동요의 시계열 거동(time history) 일부를 보이고 있다. 점선으로 표시된 것이 coarse 격자의 결과(C), 일점쇄선이 medium 격자(M), 실선이 fine 격자(F)의 결과를 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 총저항 계수의 경우, coarse 격자의 결과는 다른 두 격자 시스템의 결과와 차이를 보이고 있다. 약 10% 작은 진폭과 위상의 차이도 나타나고 있음을 알 수 있다. 하지만

medium 격자와 fine 격자의 결과는 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 종동요의 결과에서도 coarse 격자의 결과가 다른 두 결과에 비해 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 medium 격자 수준 이상을 사용하면 총저항 계수 측면에서 격자에 따른 해의 수렴성에는 문제가 없을 것으로 생각한다. 다만 운동 측면까지 고려하면 fine 격자를 사용하는 것이 타당해 보인다.



(a) Coarse grid



(b) Medium grid



(c) Fine grid

Fig. 5 Three grid systems for inner grid block

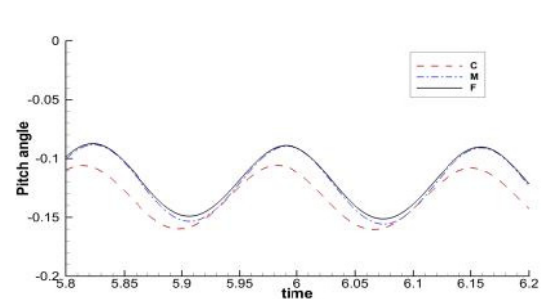
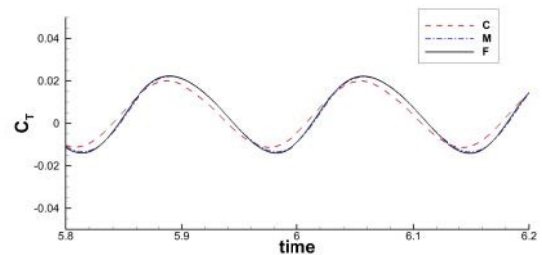


Fig. 6 Comparison of C_T and pitch angle of three grid systems

5. 결 과

5.1 계산 조건

대상 선형은 KVLCC2 선형으로 이에 대한 파랑중 부가저항 실험이 Hwang et al. (2016)에 의해 발표된 바 있다. 계산 선형 및 파랑 조건은 Hwang et al. (2016)의 실험 조건과 동일하게 설정하였다. Fig. 7은 KVLCC2의 선형 형상을 보이며, Table 1과 Table 2는 각각 KVLCC2의 주요 제원, 적용한 파랑 조건을 나타낸다. 파장은 0.3Lpp에서 2.0Lpp까지 단파장 영역에서 장파장 영역까지 설정하였고, 진폭은 Lpp의 약 1/200로 설정하였으며, 단파장 영역에서는 파 기울기(wave steepness)를 고려하여 조금 작게 설정하였다. Table 2의 수치는 파 캘리브레이션을 통하여 실험에서 얻어진 값을 나타낸다.

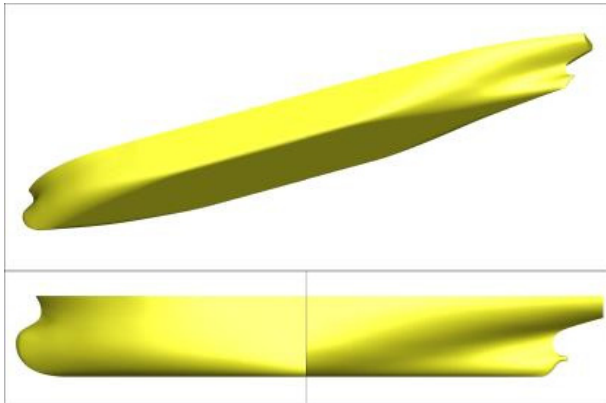


Fig. 7 Hull form of KVLCC2 model

Table 1 Principal dimension of KVLCC2

		Ship	Model
Scale ratio		1.0	1/39.44
V	[m/s]	7.9739	1.2697
Fn		0.142	
Rn		2.1×10^9	9.04×10^6
Lpp	[m]	320	8.1136
B	[m]	58	1.4706
D	[m]	30	0.7606
T	[m]	20.8	0.5274
Sw	[m ²]	27,194	17.4823
∇	[m ³]	312,622	5.0958
C _B		0.8098	
LCB	[m]	0.0348Lpp	
KG	[m]	18.6	0.4716
Kyy	[m]	0.25Lpp	

Table 2 Applied wave conditions

λ/Lpp	A/Lpp
0.300	0.003660
0.401	0.004922
0.500	0.004821
0.600	0.005155
0.701	0.005035
0.801	0.005122
0.901	0.005001
0.998	0.005028
1.101	0.005183
1.252	0.005271
1.398	0.005187
1.598	0.005167
2.002	0.005014

계산 격자는 격자 수렴성 테스트 결과를 고려하여 fine 격자를 사용하였으며, 격자수는 내부 격자와 배경 격자를 합하여 총 340만개이다. Fig. 8은 배경 격자의 분포를 보인다. 도메인의 크기는 $-1.5 < x/Lpp < 2.0$, $0 < y/Lpp < 1.2$ 로 설정하였으며, x방향의 격자 크기는 가장 짧은 파장(0.3Lpp)의 경우, 하나의 파장에 15개 정도의 격자가 분포할 수 있도록 하였으며, 모든 파장의 경우에 동일한 격자계를 사용하였다. 정의된 조건의 파랑이 유입되는 영역인 Wave prescribed zone은 $-1.5 < x/Lpp < -1.1$ 로 적용하였고, 소파 영역은 $y/Lpp > 0.8$, $x/Lpp > 1.4$ 로 하여 선체로 인해 교란된 파를 완화시키도록 하여, 주어진 영역에서 입사파의 식으로 수렴하도록 하였다 (Park et al., 2013). Fig. 9는 중첩격자기법을 이용하여 분리된 계산 영역의 일부 단면을 보인다.

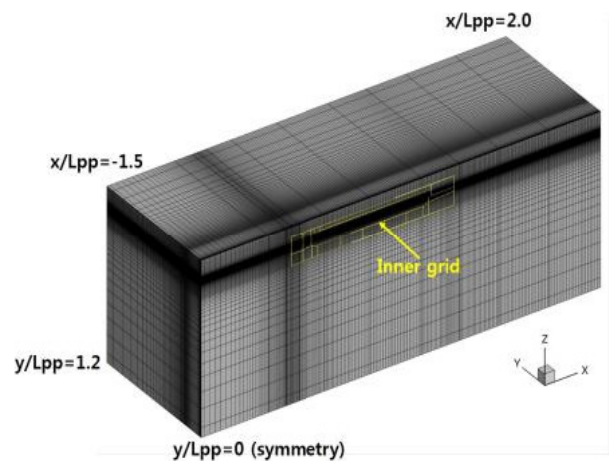


Fig. 8 Computational domain (background grid)

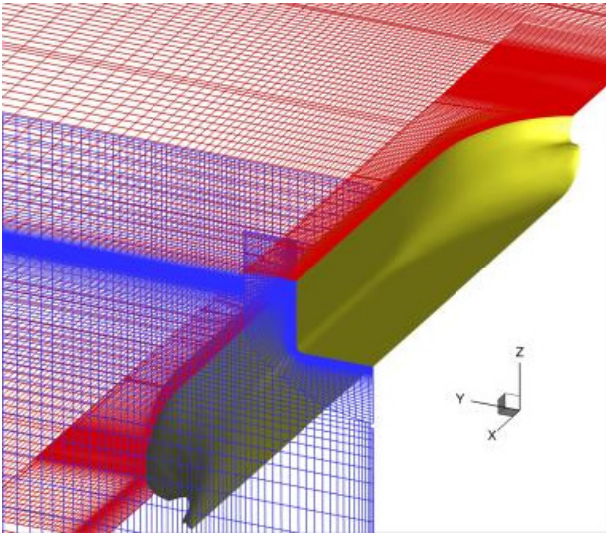


Fig. 9 Transversal and vertical cross sections of overset grid

5.2 파랑 중 운동 해석 결과

Table 2와 같이 총 13개의 파장 조건에 따른 계산을 수행하였다. 비정상 유동 계산을 수행하여 얻어진 시계열 결과를 후처리(post-processing)하여 총저항 계수의 평균값, 상하동요, 종동요의 1차 조화 진폭(1st harmonic amplitude)을 계산하여 기존의 비관성 좌표계에서 수행한 계산결과 및 실험치와 비교를 수행하였다. 조화 진폭을 계산하는 방법은 다음 식과 같이 2015년 CFD workshop Tokyo (Larsson et al., 2015)에서 제공한 푸리에 시리즈(Fourier series) 방법을 이용하였다.

$$X_F(t) = \frac{X_0}{2} + \sum_{n=1}^N X_n \cos(2n\pi f_e t + \Delta\gamma_n) \quad (7)$$

$$\Delta\gamma_n = \gamma_n - \gamma_I \quad (8)$$

$$a_n = \frac{2}{T_e} \int_0^{T_e} X(t) \cos(2n\pi f_e t) dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

$$b_n = \frac{2}{T_e} \int_0^{T_e} X(t) \sin(2n\pi f_e t) dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (10)$$

$$X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (11)$$

$$\gamma_n = \tan^{-1}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (12)$$

여기서, X_n 은 n차 조화 진폭을 의미한다.

Fig. 10는 계산된 wave pattern의 예($\lambda/Lpp = 1.0$)를 보인다. 중첩격자의 경계면을 통해서 wave pattern이 잘 전달되는 것을 확인할 수 있다.

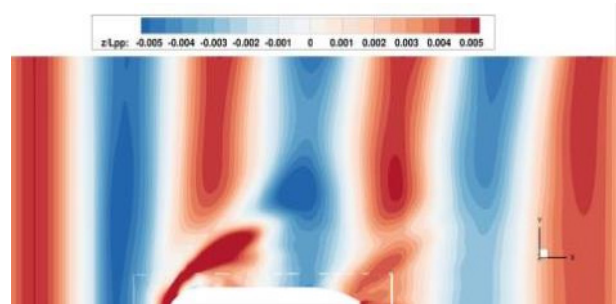


Fig. 10 Example of wave pattern at $\lambda/Lpp = 1.0$

Fig. 11과 12는 각각 상하동요(z/A)와 종동요(θ/Ak)의 1차 조화 진폭을 비교한 그림이다. 채워진 사각형 기호가 실험치(Exp)를 나타내고, 빈 사각형 실선이 비관성 좌표계에서의 WAVIS 결과(WAVIS NI, Kim et al. 2017), 원형 실선이 중첩격자계 Suggar++를 사용하여 계산된 WAVIS 결과(WAVIS SG)를 나타낸다. 파장이 1보다 큰 구간에서 중첩격자를 이용한 결과의 예측이 향상된 것을 확인할 수 있다. 비관성 좌표계를 사용할 경우, 선체의 운동에 따라서 격자계 전체가 회전 및 이동을 하게 되는데, 파장이 길어지는 구간에서는 선체의 운동 변위가 커지게 되고, 이에 따른 격자계의 이동은 자유표면을 잘 표현하기 위한 정렬된 형태에서 많이 벗어나는 경우가 발생한다. 즉 격자의 품질이 저하되면서 수치적인 오류가 증가하고 결과적으로 해의 예측도를 낮출 수 있는 원인으로 작용한다. 중첩격자기법을 활용하면, 선체 주위의 격자계만이 선체 운동으로 회전 및 이동하게 되기 때문에 상대적으로 적은 이동이 발생하고, 자유표면을 계산하기 위한 배경격자는 정렬된 형태를 유지할 수 있기 때문에, 격자계 간의 내삽에 의한 수치 오류를 상쇄하고도 예측도를 향상할 수 있는 이점이 선체 운동의 변위가 큰 경우에 발생한다고 생각된다.

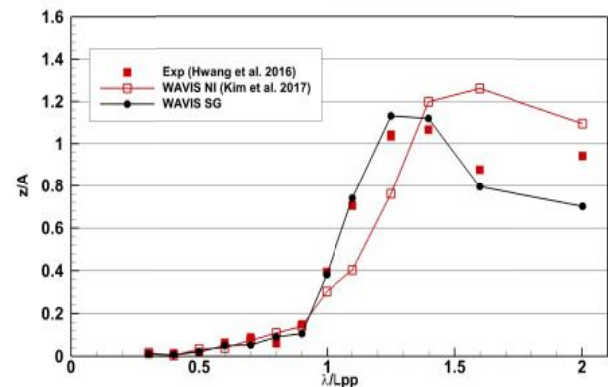


Fig. 11 Heave motion RAO

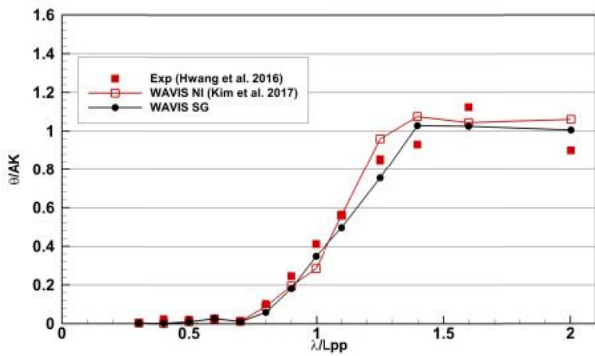


Fig. 12 Pitch motion RAO

파랑중 부가되는 저항은 식 (13)과 같이 파랑중 총저항에서 정수중 저항을 제외한 것으로 표현할 수 있으며, 부가저항 계수는 식 (14)와 같이 무차원화 하여 표현한다.

$$R_{AW} = R_T - R_{SW} \quad (13)$$

$$C_{AW} = \frac{R_{AW}}{\rho g A^2 B^2 / L_{pp}} \quad (14)$$

여기서, R_T 는 파랑중 선체가 받는 총저항을 의미하고, R_{SW} 는 정수중의 저항을 나타낸다. 정수중 저항은 비관성 좌표계를 사용하여 계산한 결과와 1% 미만의 차이를 보였다. 식 (14)에서 A 는 입사파의 진폭, B 는 선체의 폭을 의미한다. Fig. 13은 파랑중의 부가저항 계수(C_{AW}) 비교를 보인다. 앞에서 확인한 바와 같이 선체 운동 예측의 정도가 향상되면서 장파장 영역에서의 부가저항 예측도 역시 향상된 결과를 보인다. 단파장 영역에서는 기존 결과와 큰 차이를 보이지 않으나, $\lambda/L_{pp} = 1.252$ 의 부가저항계수 최고점이 비관성 좌표계에서 다소 과도하게 예측되었던 점이 개선되었고, $\lambda/L_{pp} = 0.6$ 이후의 부가저항계수 예측의 정확성이 매우 향상된 것을 확인할 수 있다.

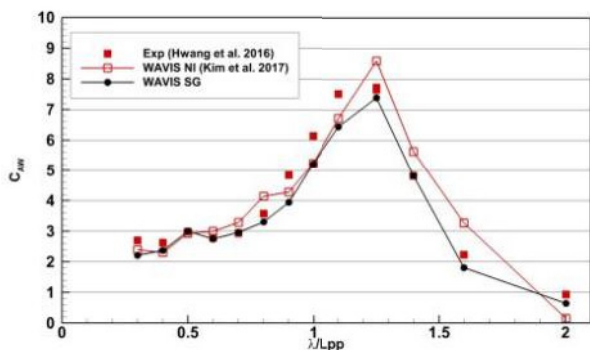


Fig. 13 Comparison of added resistance coefficients

6. 결론

본 연구에서는 선박해양플랜트연구소의 in-house 코드인

WAVIS2에 중첩격자 기법 라이브러리인 Suggar++를 접목하여, 파랑 상태의 KMLCC2의 2자유도 운동을 해석하고, 기존의 비관성 좌표계를 이용한 결과 및 실험치와 비교를 수행하였다. 선체 운동의 진폭이 커지면 비관성 좌표계에서의 해석 시 필연적으로 발생하는 격자의 품질 저하를 해소할 수 있는 중첩격자계를 사용함으로써 장파장 영역에서 선체 운동 예측의 정확도 향상을 가져올 수 있음을 확인하였다. 향상된 운동 예측으로 인해 부가저항 예측의 정확도 역시 개선됨을 확인하였다. 중첩격자계에서 발생하는 격자계간의 내삽에 의한 수치 오류의 크기는 파랑중 운동 해석의 경우 무시할 수 있는 수준으로 생각된다. 계산 시간의 경우, 미리 정해진 운동 변위에 따라 움직이는 경우에는 유동해석 중 다음 단계의 DCI를 별도의 프로세서에 할당하여 계산하므로 추가적인 시간이 소요되지 않는다. 하지만 본 연구의 경우와 같이 유동해석의 결과가 다음 시간단계의 운동 변위에 영향을 미치는 경우에는 추가적인 DCI 계산 시간이 소요된다. 추가적으로 소요되는 시간은 격자의 구성 및 개수의 영향을 받게 되는데, 본 연구에서 fine 격자를 사용한 경우는 한 시간단계에서 약 30%의 시간 증가가 발생하였다.

향후, 보다 다양한 선종에 대한 적용 및 검증이 필요하며, 6자유도 운동 해석으로의 확장을 통하여 선수파 조건 이외의 다양한 파랑 조건에서의 해석이 가능하도록 해야 하며, 이를 통해 선박 운동 및 조종 해석 분야에 대한 WAVIS의 활용도 확장에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소(KRISO) 주요사업(PES9430 및 PES9260)의 지원으로 작성되었습니다.

References

- Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noak, R.W., & Stern, F., 2007. Ship motion using single-phase level set with dynamic overset grids. *Computers & Fluids*, 36(9), pp.1415-1433.
- Castiglione, T., Stern, F., Bova, S. & Kandasamy, M., 2009. Numerical investigation of the seakeeping behavior of a catamaran advancing in regular head waves. *Ocean Engineering*, 38(16), pp.1806-1822.
- Faltinsen, O.M., Minsaas, K.J., Liapis, N. & Skjoldal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 1980.
- 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.

- Hirota, K., Matsumoto, K., Takagishi, K., Orihara, H. & Yoshida, H., 2004. Verification of Ax-bow effect based on full scale measurement. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, Japan, 241, pp.33-40.
- Hwang, S, Ahn, H., Lee, Y.Y., Kim, M.S., Van, S.H., Kim, K.S., Kim, J. & Jang, Y.H., 2016. Experimental study on the bow hull-form modification for added resistance reduction in waves of KVLCC2. *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 26 June - 2 July 2016.
- Joncquez, S.A.G., Bingham, H. & Anderson, P., 2008. Validation of added resistance computations by a potential flow boundary element method. *27th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea, 2008.
- Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and calculations on four Wigley hull forms, report 0909-DUT-92*. Delft: Delft University of Technology.
- Kim, J., Kim, K.S., Park, I.R. & Van, S.H., 2010. Numerical simulations for high speed ships in deep and shallow water with sinkage and trim. *11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S. & Van, S.H., 2005. RANS simulation for KRISO container ship and VLCC tanker. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42, pp.593-600.
- Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S., Van, S.H. & Kim, Y.C., 2011. Development of numerical method for the evaluation of ship resistance and self-propulsion performances. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48, pp.147-157.
- Kim, K.H. & Kim, Y., 2011. Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method. *Ocean Engineering*, 28, pp.1357-1367.
- Kim, Y.C., Kim, K.S., Kim, J., Kim, Y., Park, I.R. & Jang, Y.H., 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(6), pp.641-654.
- Kuroda, M., Tsujimoto, M. & Sasaki, N., 2012. Development of STEP for the reduction of added resistance in waves. *22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2012.
- Larsson, L, Stern, F., Visonneu, M., Hirata, N., Hino, T. & Kim, J., 2015. *Tokyo 2015 A workshop on CFD in ship hydrodynamics Volume II*, Tokyo, Japan, 2-4 December 2015.
- Maruo, H., 1960. The drift of a body floating on waves. *Journal of Ship Research*, 4, pp.1-10.
- Noack, R.W., Boger, D.A. & Kunz, R.F., 2009. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability. *19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, San Antonio, USA, 22-25 June 2009.
- Orihara, H. & Miyata, H., 2003. Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using overlapping grid system. *Journal of Marine Science and Technology*, 8, pp.47-60.
- Park, D., 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.
- Salvesen, N., 1978. Added resistance of ships in waves. *Journal of Hydronautics*, 12(1), pp.24-34.
- 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, 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.
- Seo, S. & Park, S., 2017. Numerical simulations of added resistance and motions of KCS in regular head waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.132-142.
- Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S. & Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 18, pp.435-459.
- Stern, F., Wilson, R. & Shao, J., 2005. Quantitative

V&V of CFD simulations and certification of CFD codes. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 50, pp.1335–1355.

Storm-Tejsen, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D., 1973. Added resistance in waves. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 81, pp. 109–143.

Suhs, N.E., Rogers, S.E. & Dietz, W.E., 2002. PEGASUS 5: An automated pre-processor for overset-grid CFD. *AIAA 2002-3186, 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference*, St. Louis, Missouri, USA, 2002.

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.

Valanto, P. & Hong, Y., 2015. Experimental investigation on ship wave added resistance in regular head, oblique, beam and following waves. *25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona, Hawaii, USA, 2015.

