

RANS 방법을 이용한 파랑 중 선박운동 해석

박일룡¹ · 김 진[†] · 김유철² · 김광수² · 반석호² · 서성부¹
동의대학교 조선해양공학과¹
한국해양과학기술원, 선박해양플랜트연구소²

Numerical Prediction of Ship Motions in Wave using RANS Method

Il-Ryong Park¹ · Jin Kim[†] · Yoo-Chul Kim² · Kwang-Soo Kim² · Suak-Ho Van² · Sung-Bu Suh¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-Eui University¹
Maritime and Ocean Engineering Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology²

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.

This paper provides the structure of a Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) based simulation method and its validation results for the ship motion problem. The motion information of the hull computed from the equations of motion is considered in the momentum equations as the relative fluid motions with respect to a non-inertial coordinates system. A finite volume method is used to solve the governing equations, while the free surface is captured by using a two-phase level-set method and the realizable k- ϵ model is used for turbulence closure. For the validation of the present numerical approach, the numerical results of the resistance and motion tests for DTMB 5415 at two ship speeds are compared against available experimental data.

Keywords : Ship motion(선박운동), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), Level-set method(레벨셋법), Finite volume method(유한체적법)

1. 서론

파랑 중 선박운동 해석에 있어 탁월한 결과들을 제공하고 있는 포텐셜유동을 근간으로 하는 수치해석 기법들의 강점과 유용함은 많은 연구결과들을 통해 설명되고 증명되어 왔다 (Beck & Reed, 2001). 반면, CFD(Computational Fluid Dynamics)의 경우 최근 10년에 들어와서야 컴퓨팅 시간을 단축하는 기술과 함께 운동해석에 필요한 수치 접근법들에 대한 연구들이 활발히 수행되고 있다 (Park, et al., 2003; Shin & Kim, 2006; Carrica, et al., 2007; Park, et al., 2008; Yang, et al., 2012; Nam, et al., 2013). 현 단계의 CFD는 설계시 요구되는 선박의 저항성능 정보를 제공하는데 있어 모형시험 결과와 더불어 차츰 높은 신뢰를 얻고 있고 이 분야에서의 그 활용도는 매우 높은 편이다. 반면, 운동성능 해석의 경우는 대진폭 운동을 포함하여 다양한 파랑 조건에 대해 체계적으로 그 정확도를 검증해야하는 단계에 있다. 이와 더불어, 향후 활용도를 높이기 위해서는 아직도 계산 시간의 부담을 더 줄여야 하는 노력이 필요한 상황에 놓여있다. CFD의 궁극적 발전 방향은 선박의 운동성능 해석에 관련된 모든 문제를 다루고 그 결과들을 설계에 반영하려는 범용성의 목적보다, 포텐셜유동 해석법이 한계로 가지는 점성유동이 지배적인 유동과 모형시험이 어려운 영역의 문제를 효과적이고 정확하게 해석할

수 있는 수치해석기법으로 발달해야할 것으로 판단된다.

본 논문은 선형 설계 현장에서 저항 및 저항성능 평가기술로 비교적 높은 신뢰도를 얻고 있는 WAVIS 2.2 (Kim, et al., 2011)를 바탕으로 파랑 중 선박운동을 해석할 수 있는 새로운 버전인, WAVIS-6DoF 개발에 사용한 수치기법의 설명과 그 검증 내용을 제공한다. 개발된 수치기법은 Song, et al. (2010)의 연구와 같이 선수 선형의 개선을 통한 파랑 중 부가저항 감소 연구에 주로 사용될 계획이다. 본 논문에서 사용한 수치기법은 주로 유한체적법(finite volume method)과 자유수면 해석을 위한 레벨셋법(level-set method)으로 유동의 지배방정식인 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식의 해를 구하는데 기반을 두고 있다. 선체의 운동은 6자유도 운동방정식을 풀어 구하고 이를 유동의 운동량방정식에 적용하기 위해 선체의 운동을 선체 주위 유체의 상대운동으로 치환하여 해석할 수 있는 비관성좌표계(non-inertial coordinates system) 해법을 도입하였다. 이 방법은 구해진 선체의 운동에 따라 사용된 격자를 운동시키거나 변형해야 하는 복잡하고 어려운 수치기법을 피할 수 있고, 고정된 격자에 대해 지배방정식만을 풀기 때문에 계산 시간의 장점이 우수하다. 수치기법의 검증을 위해 DTMB 5415선형을 대상으로 두 선속의 조건에 대해서 정수 중 저항문제와 선수파(head sea) 중 운동문제를 해석하고 그 결과들을 모형시험의 결과와 각각 비교하여 검토하였다.

2. 문제의 정식화와 수치해석 방법

2.1 지배방정식

파랑 중 운동하는 선박 주위의 유동을 비압축성 난류유동으로 가정할 때 지배방정식인 연속방정식과 표면장력의 영향을 제외한 RANS방정식은 Fig.1의 선체의 중심점(C.G)에 고정된 좌표좌표 $x_i = (x, y, z)$ 를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

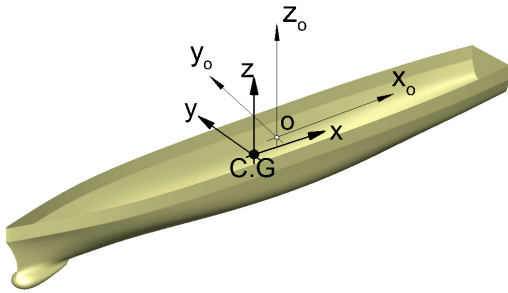


Fig. 1 Coordinates system

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_e \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + \rho b_i \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체밀도이며, u_i 는 각 좌표축 방향의 유체속도 성분 (u, v, w), 그리고 p 는 압력을 나타낸다. δ_{ij} 는 Kronecker's delta, k 는 난류의 운동에너지 그리고 μ_e 는 난류 와점성계수(turbulent eddy viscosity) μ_t 와 유체의 점성계수 μ 를 합한 유효 점성계수(effective viscosity)이다. 난류 와점성계수 μ_t 는 realizable $k-\epsilon$ 난류모델 (Shih, et al., 1995)과 Launder and Spalding (1974)의 벽함수(wall function)기법으로 모델링하였다. 마지막으로 b_i 는 각 좌표축 x_i 방향의 단위 질량당 체적력(body force)을 나타낸다. 수치해석에서 지배방정식의 모든 변수는 선속 U , 선체길이 L_{pp} 그리고 물의 밀도로 무차원화되어 사용되었다.

지배방정식의 해는 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 구하였다. 여기서, 시간적분은 1차 정도의 Euler법으로 수행되며, 대류항과 확산항에 대한 이산화는 3차 정도의 MUSCL (Monotonic Upstream centered Scheme for Convection Laws, van Leer, 1979)법과 2차 정도의 중앙차분법(central difference scheme)으로 수행하였다. 연속방정식을 만족시키기 위한 속도-압력의 연성은 SIMPLE (Patankar, 1980)알고리즘을 이용하였다.

2.2 자유수면 모델링 및 입사파

입사파(incoming wave) 및 선체에 의한 산란파와 방사파에 대한 자유수면 운동은 Sussman, et al. (1998)이 제안한 레벨셋법(level-set method)을 이용하여 모델링하였다. 유동장으로 입사되는 파에 대한 조건은 선형파이론(linear wave theory)에서 유도된 다음의 규칙파의 진폭과 속도분포에 대한 식 (Newman, 1977)으로 주어진다.

$$\varphi(x_o, y_o, z_o, t) = \zeta(x_o, y_o, z_o, t) - z \quad (3)$$

$$\zeta(x_o, y_o, z_o, t) = A \cos(k_w x_o - 2\pi f t) \quad (4)$$

$$u(x_o, y_o, z_o, t) = U_\infty + \frac{A}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w(z_o + \min(\phi, 0))} \cos(k_w x_o - 2\pi f t) \quad (5)$$

$$w(x_o, y_o, z_o, t) = \frac{A}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w(z_o + \min(\phi, 0))} \sin(k_w x_o - 2\pi f t) \quad (6)$$

$$f = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{Fr \sqrt{2\pi\lambda}} \quad (7)$$

여기서, φ 와 ζ 는 각각 Fig.1에 보인 선체와 같이 이동하는 선체중심(midship)의 수면에 놓인 좌표계(x_o, y_o, z_o)에 대한 레벨셋함수와 진폭 A 의 파함수다. k_w 는 파수(wave number), λ 는 파장, Fr 은 Froude수이며, f 는 조우진동수(encounter frequency)을 나타낸다.

2.3 운동방정식

선체의 운동은 회전운동이 Fig. 1에 보이는 선체의 무게 중심점(C.G)에 대해 발생하는 것으로 가정하고 아래의 운동방정식들을 풀어 구한다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u}_b - v_b r + w_b q) &= F_x \\ m(\dot{v}_b - w_b p + u_b r) &= F_y \\ m(\dot{w}_b - u_b q + v_b p) &= F_z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y) q r &= M_x \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z) r p &= M_y \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x) p q &= M_z \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, m 과 (I_x, I_y, I_z) 는 각각 선체의 질량과 관성모멘트이며, (u_b, v_b, w_b) 와 (p, q, r) 는 무게 중심점에 고정된 좌표계

에 대한 선체의 병진속도와 회전속도 성분들을 나타낸다. 또한, (F_x, F_y, F_z) 와 (M_x, M_y, M_z) 는 이 좌표계 각각의 방향으로 선체에 작용하는 힘과 모멘트이다.

힘과 모멘트가 주어질 경우 운동방정식으로부터 가속도를 구하고 이를 이용하여 운동변위를 얻기 위한 수치해석법으로는 1차 정도의 Euler법을 이용하였으며 다음과 같이 속도와 변위를 구하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}^n &= \dot{\Phi}^{n-1} + \ddot{\Phi}^n \Delta t \\ \Phi^n &= \Phi^{n-1} + \dot{\Phi}^n \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, Φ , $\dot{\Phi}$, $\ddot{\Phi}$ 는 각각 병진 또는 회전운동의 변위, 속도 그리고 가속도이고, Δt 는 시간간격을 나타낸다.

2.4 비관성좌표계 해법

본 논문에서는 선체운동의 영향을 유동의 지배방정식에서 고려할 때 격자를 이동하거나 변형시키는 복잡한 수치기법을 피하고 선체의 비관성좌표계에 대한 주위 유체의 상대적 운동으로 치환하여 고려하였다. 이는 구체적으로 유동의 지배방정식의 우변에 각 좌표계 방향의 외력항으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} b_1 &= -2(qw - rv) - q(py - qx) + r(rx - pz) - \dot{q}z + \dot{r}y - \dot{u}_b \quad (10) \\ &\quad + g \sin \theta \\ b_2 &= -2(ru - pw) - r(qz - ry) + p(py - qx) - \dot{r}x + \dot{p}z - \dot{v}_b \\ &\quad - g \sin \phi \cos \theta \\ b_3 &= -2(pv - qu) - p(rx - pz) + q(qz - ry) - \dot{p}y + \dot{q}x - \dot{w}_b \\ &\quad - g \cos \phi \cos \theta \end{aligned}$$

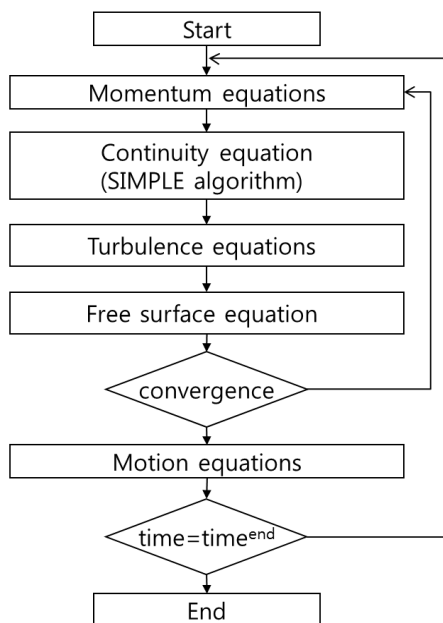


Fig. 2 Solution algorithm

여기서, $(\dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$ 은 좌표계 각 방향에 대한 각가속도를 나타내고, $(\dot{u}_b, \dot{v}_b, \dot{w}_b)$ 는 선체의 병진운동에 따른 가속도 성분들을 나타낸다. g 는 중력가속도 값이며, ϕ 와 θ 는 각각 비관성 좌표계의 x 와 y 축에 대한 회전각도 즉, 횡동요(roll)와 종동요(pitch) 변위를 나타낸다. 상기 식(9)의 우변은 각각 Coriolis 영향, 원심력 (centrifugal force), 각가속도 변화 및 병진이동에 대한 가속도들에 대한 영향을 고려하고 있다.

유동의 지배방정식에서 시작하여 운동방정식의 해를 구하고 이를 다음 시간단계의 유동계산에 고려하여 해석을 진행하는 방식으로 본 수치기법의 수치계산 알고리즘은 Fig. 2와 같다.

3. 수치해석 결과

개발된 수치기법은 검증을 위해 먼저 선체의 자세변화를 가지는 정수 중 저항성능 해석에 적용하고 모형시험 및 타 수치기법의 결과와 비교하였다. 대상 선형은 축척비(scale ratio)가 24.83인 이탈리아 INSEAN 2340모형으로 Fig. 3에 나타난 미해군의 군함 DTMB 5415선형에 대한 여러 축척비의 선형들 중 하나이다. Table 1에서 이 선형에 대한 자세한 주요제원을 참조할 수 있다.

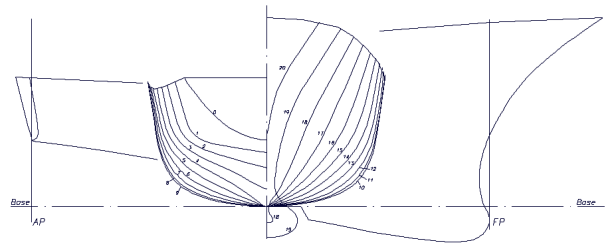


Fig. 3 DTMB 5415 lines, bow and stern profiles

Table 1 Main parameters of the DTMB 5415

Items	Full scale
Length L_{PP}	142.0 m
Draft T	6.15 m
Beam B	19.06 m
Wetted surface area S	2972.6 m ²
Block coefficient (CB)	0.507
LCB (% L_{PP})	-0.683
KG	7.5473 m
K_{xx} / B	0.37
$K_{yy} / L_{PP}, K_{zz} / L_{PP}$	0.25

파랑 중 선박운동 해석은 저항성능 해석에 상용된 대상 선형과 동일한 선형인 DTMB 5415의 상사 선형(geosym)인 축척비 46.6 크기의 DTMB 5512모형선으로 미국 IOWA대학 IHR에서 수행된 모형시험 조건을 따랐다. 특별히, 이 모형시험은 선박운동에 대한 CFD 해석을 검증할 목적으로 수행되었으며, CFD 검증용으로 매우 유용한 자료인 시간에 따른 운동변위를 계측한 결과를 제공하고 있다.

3.1 격자와 경계조건

본 논문에서 사용되어진 격자계는 O-H형태로 Fig. 4에 그 영역과 경계면에서의 경계조건을 설명하고 있다. 입사되는 파가 있을 경우 2.2절의 조건식을 대칭경계면(symmetry boundary)과 공기영역을 제외한 모든 경계면에 부과하였다. 이 때, 2.4절에 설명한 바와 같이 유입유동 및 파에 의해 교란된 유체의 유속을 제외하고 선체운동을 유체의 상대운동으로 치환할 경우 나타나는 속도조건을 함께 고려하게 된다. 전체 격자점 수는 조밀한(fine) 2.8M이며 운동해석에서 격자수 의존성을 보기위해 $1/\sqrt{2}$ 배의 1.98M의 덜 조밀한(medium) 격자에 대한 결과를 함께 비교하였다. Fig. 5는 선체 주위의 격자분포를 보여주고 있다.

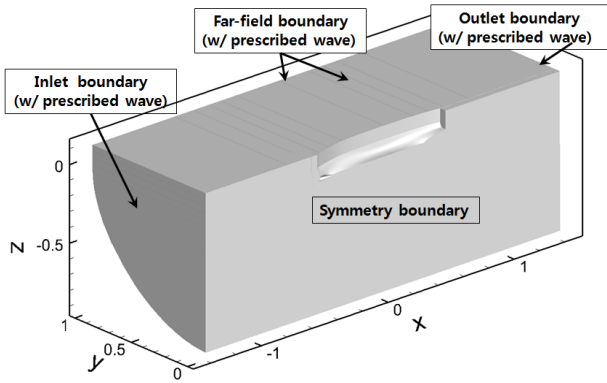


Fig. 4 Grid topology and boundary conditions

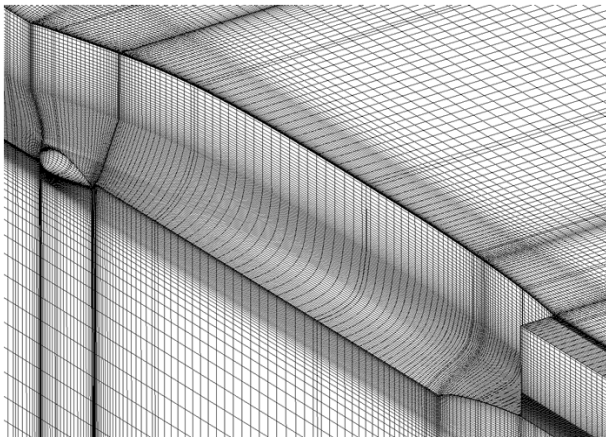


Fig. 5 Grid distribution around the hull surface

3.2 정수 중 저항해석 결과

상하동요와 종동요인 각각 트림과 침하의 자세변화를 가지는 저항성능 해석은 DTMB 5415선형에 대해 $Fr=0.28$ 과 0.41 조건에서 수행되었으며, 이 때 INSEAN모형에 대한 Reynolds수는 각각 $Re=1.19 \times 10^7$ 그리고 1.75×10^7 이다. 본 문제의 경우 정상상태(steady state)문제로 볼 수 있기 때문에 선체운동의 수렴을 빠르게 하기위해 운동방정식에 다음과 같이 속도에 가중치 α

(0.02~0.1)를 곱한 가상의 감쇠영향을 부과하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} m\dot{w}_b &= F_z - \alpha w_b \\ I_y \dot{q} &= M_y - \alpha q \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 6은 $Fr=0.28$ 에서 WAVIS-6DoF로 계산한 운동과 저항에 대한 수렴거동을 보여주고 있다. 가상의 감쇠영향으로 약 $t=15s$ 이후 빠르게 선체의 자세가 수렴되고 그 크기들이 모형시험의 결과와 타당한 일치율을 보여주고 있다.

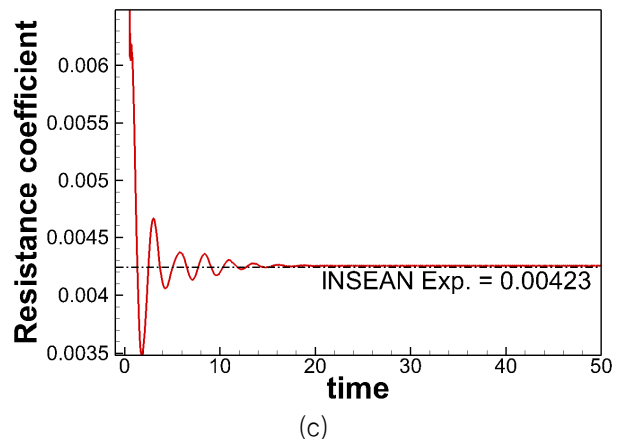
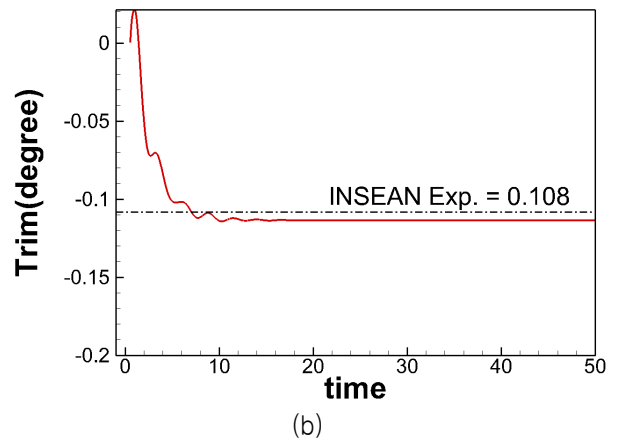
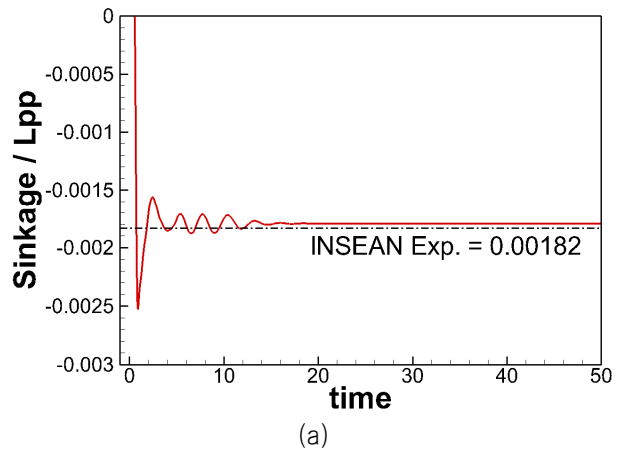


Fig. 6 Convergence history of the sinkage(a), trim(b) and resistance(c) for $Fr=0.28$

Table 2는 작은 크기의 DTMB 5512모형을 사용한 IOWA대학 IIHR의 결과와 유체정역학적 평형조건을 이용하는 준정상적 방법 (quasi-steady method, Kim, et al., 2011)으로 정상상태 선체자세만을 계산하는 기존 WAVIS 2.2의 결과를 함께 고려하여 비교하고 있다. Reynolds수가 작은 IIHR의 모형시험 결과에서 예측된 선체자세와 저항이 INSEAN보다 다소 큰 값을 보여주고 있다. WAVIS-6DoF와 WAVIS-2.2의 두 수치해석 결과는 서로 근소한 차이를 나타내며 INSEAN의 모형시험결과와 만족스러운 일치를 보여주고 있다.

Table 2 Comparison between the CFD and experimental results for Fr = 0.28

CFD & Exp.	Sinkage/ L_{pp}	Trim(deg.)	Resistance
WAVIS-6DoF	0.00180	0.114	0.00426
WAVIS 2.2	0.00179	0.117	0.00421
INSEAN Exp.	0.00182	0.108	0.00423
IIHR Exp.	0.00190	0.135	0.00461

Table 3 Comparison between the CFD and experimental results for Fr = 0.41

CFD & Exp.	Sinkage/ L_{pp}	Trim(deg.)	Resistance
WAVIS-6DoF	0.00445	0.361	0.00655
WAVIS 2.2	0.00447	0.346	0.00648
INSEAN Exp.	0.00469	0.419	0.00667
IIHR Exp.	0.00470	0.360	0.00673

Fig. 7은 Fr=0.41에서 선체자세와 저항에 대한 WAVIS-6DoF의 해의 수렴거동을 보여주고 있다. 이 경우는 약 t=25s 이후 빠르게 선체의 자세가 수렴되고 있고, 그 크기들의 절대값은 모형시험보다 다소 작은 값으로 예측되고 있다. Table 3을 보면 WAVIS-6DoF가 WAVIS 2.2보다 INSEAN의 모형시험 결과에 약간 더 가까운 결과를 보이고 있지만, Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 트림의 경우 수치해석 결과가 다소 과소평가 되어 있다. 반면, Reynolds수가 작은 IIHR의 모형시험 결과는 앞서 Fr=0.28의 결과와는 달리 트림에서 본 수치해석 결과와 같이 INSEAN의 결과보다 작은 값을 보이고 있다. 높은 선속에서 이 같은 트림변화를 제외하고 대체적으로 모형시험의 결과에 대해 수치해석 결과가 타당한 일치를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

3.3 파랑 중 운동해석 결과

파랑 중 운동해석은 IIHR에서 DTMB 5512선형에 대해 선수파(head sea)중 선속 Fr=0.28과 0.41에서 수행한 모형시험의 조건

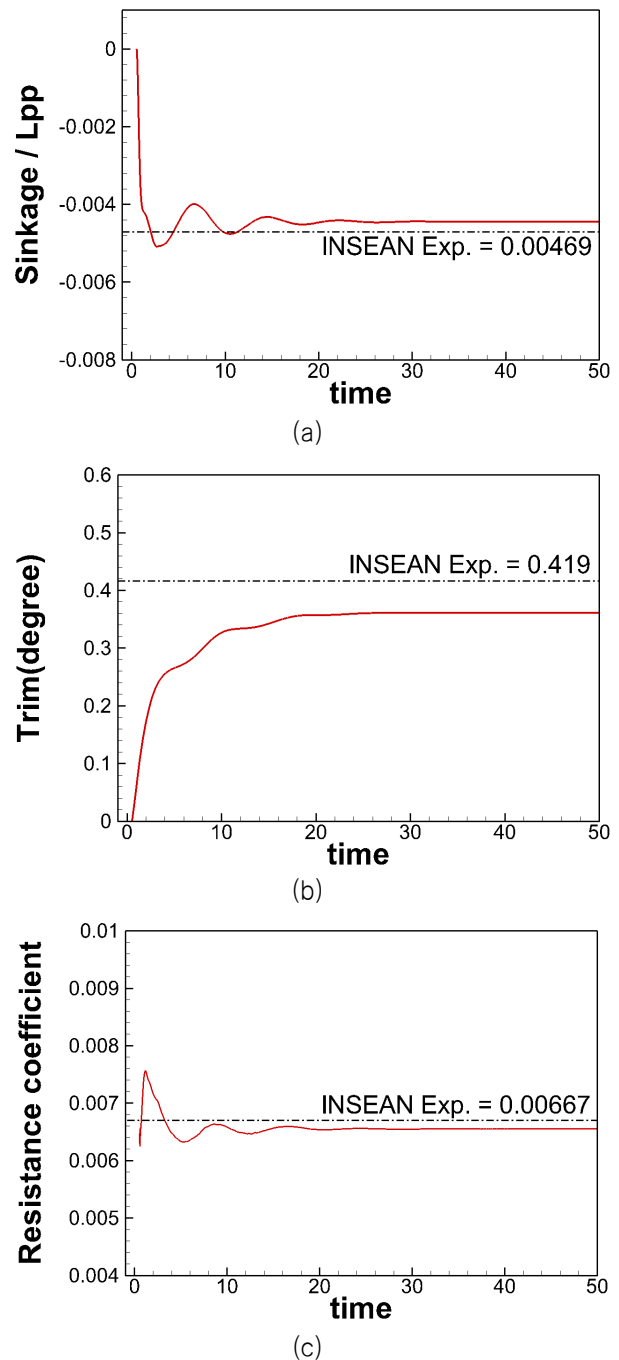


Fig. 7 Convergence history of the sinkage(a), trim(b) and resistance(c) for Fr=0.41

을 따르며, 이 때 Reynolds수는 각각 $Re=4.65 \times 10^6$, 6.85×10^7 이다. 여기서, 선수파의 파장은 $\lambda=1.5L_{pp}$ 이고 파진폭은 $a=0.005968L_{pp}$ 이다. CFD 검증 데이터 제공을 주목적으로 수행된 모형시험으로 특별히, 상하동요와 종동요의 시계열 데이터를 수치해석 결과와 비교해 볼 수 있다.

본 수치기법의 경우 선체와 선체의 운동으로 발생한 산란파와 방사파가 격자 경계면에서 수치적으로 반사되어 전체 해에 미치는 영향이 다소 클 수 있다. Fig. 8은 Fr=0.28에서 계산된 파정이

선수를 지나는 시점의 선체 주위 파의 진폭에 대한 등고선 분포를 보여주는데, 수치반사 문제를 해결하기 위해 격자 경계면을 상류①, 측면② 그리고 하류③의 세 영역으로 나누고 수치적인 처리를 수행했다. 상류①에서는 입사파 조건식만을 부과하고, 측면② 그리고 하류③에서는 선체에 의해 유기된 파만을 소파시키는 다음 식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \int_{\Omega} \varphi d\Omega + \int_S \varphi u_i n_i dS = -\beta(\varphi + z) \quad (12)$$

여기서, β 는 소파영역 밖에서는 영이며 소파영역이 시작되는 점에서부터 거리의 제곱에 비례하여 증가하고 본 연구에서는 20의 값을 갖도록 하였다. 수치 실험을 통해 소파영역의 시작은 선측으로부터 약 $0.7 \sim 0.8 L_{pp}$, 하류는 $1.2 \sim 1.3 L_{pp}$ 위치 정도로 결정하였다. 결국, 식(12)는 소파영역에서 φ 값이 식(4)에 주어진 입사파 식으로 수렴되게 한다.

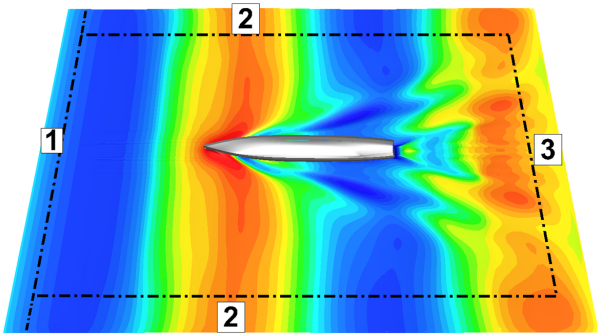


Fig. 8 Definition of wave damping region

이러한 소파영역을 사용했을 때와 그렇지 않은 경우의 해의 수렴을 Fig. 9에 서로 비교하였다. 먼저, 소파영역을 사용하지 않았을 경우 격자 경계면의 수치 반사파의 영향으로 힘과 운동의 진폭에 대한 시계열 변화가 다소 불규칙해지고 진폭의 감소가 유발되는 것을 볼 수 있는데, 상하동요의 경우 이러한 진폭의 감소가 두드러져 있다. 반면, 소파영역을 사용했을 때, 운동과 힘 모두 초기 천이 시간영역 이후 균일한 시계열 거동을 보여준다.

Fig. 10은 $Fr=0.28$ 에서 WAVIS-6DoF로 계산한 상하동요와 종동요 응답의 시계열을 모형시험에서 계측된 결과와 비교하고 있다. 여기서, 시계열의 시간은 모형시험의 최초의 계측 데이터 중 운동응답이 균일한 시간대의 결과이다. 수치해석은 조밀한 fine격자와 $1/\sqrt{2}$ 배의 더 조밀한 medium격자에 대해서 각각 수행하고 그 결과를 함께 비교하였다. Medium격자 결과가 fine격자보다 약간 큰 진폭의 양상을 보이거나 이는 무시할만하며 두 결과가 서로 잘 일치하고 있다. 상하동요 및 종동요 모두 수치해석의 결과가 평균값으로 모형시험보다 약간 양과 음의 방향으로 각각 치우쳐 있는 것을 제외하고 계측된 결과와 만족할만한 일치를 보여주고 있다.

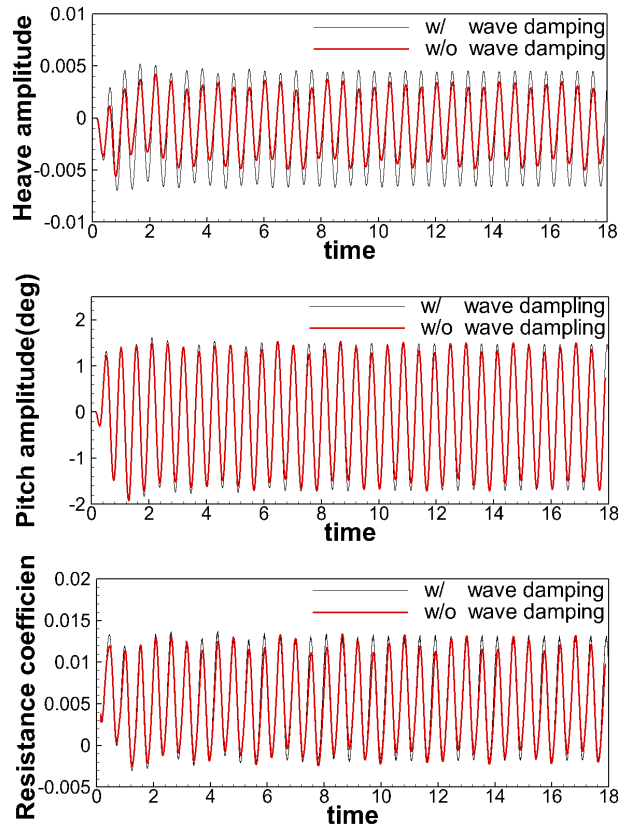


Fig. 9 Computed solutions with and without damping region at $Fr=0.28$

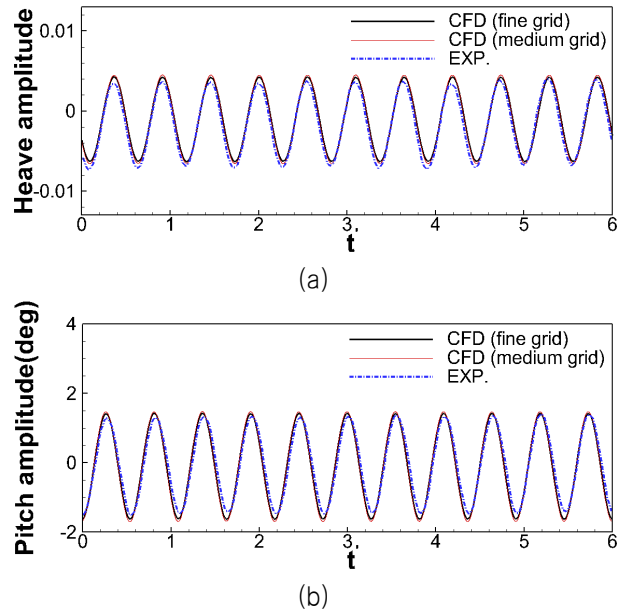


Fig. 10 Comparison of the heave(a) and pitch(b) amplitudes for $Fr=0.28$

Fig. 11은 $Fr=0.41$ 에서 계산한 상하동요와 종동요 응답의 시계열을 모형시험에서 계측된 결과와 비교하고 있다. 동일하게 medium격자와 fine격자 결과들의 차이는 매우 근소하다. 다만,

선속이 빨라지면서 상하동요 및 중동요 진폭에 대한 수치해석 결과가 모형시험보다 다소 커졌으며, 그 평균값들이 $Fr=0.28$ 보다 양과 음의 진폭방향으로 각각 더 많이 치우쳐진 차이를 보여주고 있다. 이는 앞서 정수중 저항해석 결과와 마찬가지로 선속이 높을 때 수치해석과 모형시험 간의 결과들이 낮은 선속의 경우보다 차이를 보이는 현상과 비슷하다. 실제 모형시험 수행 조건과 정확히 일치하지 않는 수치해석 조건들이 존재할 수 있으나, 그 보다는 선체와 선체운동으로 유발되는 산란파와 방사파 및 관련 국부유동 모사에 대해 수치해석이 가지는 모델링 오차가 이러한 차이를 만드는 주요 원인인 것으로 판단된다. 높은 선속에서 다소 차이를 보이지만, 대체적으로 모형시험 결과와 비교했을 때 WAVIS-6DoF의 해석정도는 만족할만한 수준인 것으로 판단된다.

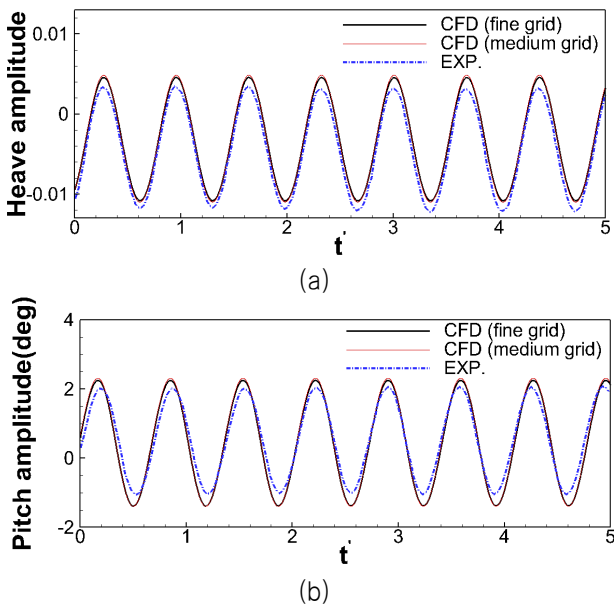


Fig. 11 Comparison of the heave(a) and pitch(b) amplitudes for $Fr=0.41$

힘에 대한 모형시험 계측 결과의 부재로 Fig. 12는 $Fr=0.28$ 과 0.41 에서 계산된 저항의 시계열만을 서로 비교하고 있다. 초기 천이 시간영역 이후 균일한 시계열 거동을 보이고 있으며, 저속에서 저항의 진폭이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 선체의 상하동요 및 중동요 운동에 의해 저항의 진폭이 증가한 것으로 볼 수 있으며, 선속이 높아지면서 선체운동에 기인된 이러한 저항진폭 증가 현상이 감소하였다. 그러나 힘의 시간평균을 볼 때 저항은 그림에 함께 비교하여 나타난 정수 중 저항해석의 결과와 같은 경향으로 고속에서 큰 저항값을 보여주고 있다. 정수 중 저항값과 비교했을 때 두 선속에서의 부가저항(added resistance) 크기를 대략적으로 확인할 수 있다.

Fig. 13은 두 선속에서 저항이 가장 큰 시점에서 선체 주위의 파형분포를 보여주고 있다. 대체로 파정(wave crest)이 선수를 통과하는 시점이고, 입사파에 대해 전진속도를 가진 선체와 선체의 운동으로 인해 발달된 산란파와 방사파의 복잡한 파계 특성을 볼 수 있다.

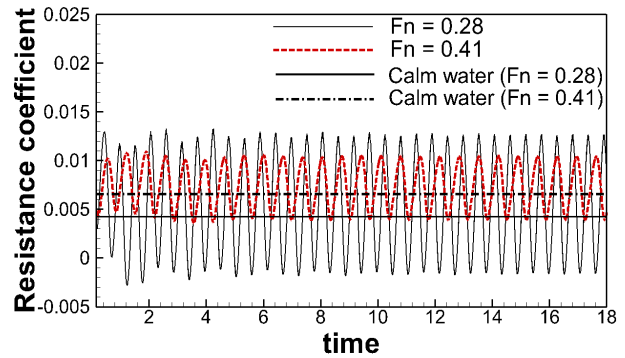


Fig. 12 History of the resistance coefficients for $Fr=0.28$ & 0.41

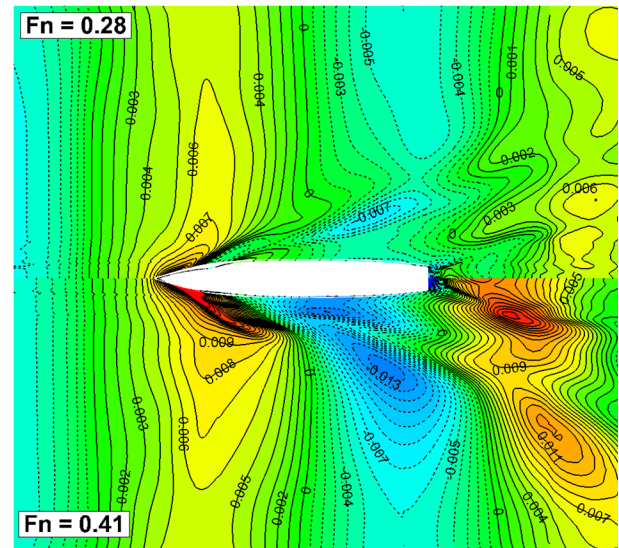


Fig. 13 Wave patterns for $Fr=0.28$ & 0.41 at each maximum resistance coefficient

4. 결론

본 논문에서는 RANS기반의 유동의 지배방정식을 사용하여 파랑중 선박운동 해석을 수행할 수 있는 수치기법, WAVIS-6DoF와 이를 검증한 내용을 소개하였다. 격자의 운동 및 변형을 고려하는 다소 어렵고 복잡한 수치기법을 피하고 선체운동을 비관성 좌표계법을 이용하여 유체의 상대운동으로 치환하여 푸는 방법을 사용하였다. 한편, 이 방법은 격자 경계면에서 반사되는 수치파가 해에 미치는 영향이 다소 현저하기 때문에 이를 제거할 수 있는 적절한 수치기법을 설명하였다. 검증을 위해 DTMB 5415선형의 두 가지 선속에 대한 저항문제와 선수파 중 운동문제에 적용하여 모형시험의 결과와 각각 비교하고 검토하였다. 높은 선속에서의 선체의 운동변위가 낮은 선속보다 차이를 보이고 있지만 모형시험의 결과와 비교했을 때 본 수치기법의 정도는 만족할 수 있는 타당한 수준을 가지는 것을 볼 수 있었다. 향후 보다 다양한 선종과 파랑조건에 대한 검증과 수치해석 기법에 도입된 각 수치

모델의 오차를 줄여 해의 정도를 높이는 연구를 계속 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부의 산업융합원천기술개발사업(PNS 2000)과 한국해양과학기술원 주요사업(PES156G)의 지원으로 작성되었습니다.

References

- Beck, R. & Reed, A., 2001. Modern seakeeping computations for ships. *23rd ONR Symposium on Naval Hydrodynamics*, Val de Reuil, France.
- Carrica, P.M. Wilson, R.V. Noack, R.W. & Stern, F., 2007. Ship Motions using Single-phase Level Set with Dynamic Overset Grids. *Computers & Fluids*, 36(9), pp.1414-1433.
- Kim, J. et al., 2011. Development of a Numerical Method for the Evaluation of Ship Resistance and Self-Propulsion Performances. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.147-157.
- Lauder, B.E. & Spalding, D.B., 1974. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), pp.269-289.
- Nam, B.W. et al., 2013. Numerical Study on Wave-induced Motion of Offshore Structures Using Cartesian-grid based Flow Simulation Method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(6), pp.7-13.
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press: Cambridge.
- Park, I.R. Hosseini, S.H.S. & Stern, F., 2008. Numerical Analysis of Ship Motions in Beam Sea Using Unsteady RANS and Overset Grid Methods. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(2), pp.109-123.
- Park, J.C. Chun, H.H. & Song, K.J., 2003. Numerical Simulation of Body Motion Using a Composite Grid System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.36-42.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis. ISBN 978-0-89116-522-4.
- Shin, S. & Kim, H.T., 2006. Numerical Simulation of a Viscous Flow Field Around a Deforming Foil Using the Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(5), pp.538-549.
- Shih, T.H. Liou, W.W. Shabir, A. & Zhu, J., 1995. A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation. *Computers and Fluids*, 24(3), pp.227-238.
- Song, J.S. Bae, J.H. Kim, M.H. & Ahn, S.M., 2010. Numerical analysis of additional resistance estimation for low speed full ship. *Proceedings of the Annual Spring Meeting the Society of Naval Architects of Korea*, ICC, Je-ju, 3-4 June 2010.
- Sussman, M. Fatemi, E. Smerera, P. & Osher, S., 1998. An Improved Level-Set Method for Incompressible Two-Phase Flows. *Computers and Fluids*, 27(5-6), pp.663-680.
- 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.
- Yang, K.K. Nam, B.W. Lee, J.H. & Kim, Y.H., 2012. Analysis of Large-Amplitude Ship Motions Using a Cartesian-Grid-based Computational Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.461-468.

