

직교격자 기반 수치기법을 이용한 선박의 대변위 운동해석

양경규¹·남보우^{1,2}·이재훈¹·김용현^{1,†}
서울대학교 조선해양공학과¹
한국해양과학기술원 해양플랜트연구부²

Analysis of Large-Amplitude Ship Motions Using a Cartesian-Grid-based Computational Method

Kyung-Kyu Yang¹·Bo-Woo Nam^{1,2}·Jae-Hoon Lee¹·Yonghwan Kim^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Ocean Plant Research Division, Korea Institute of Ocean Science and 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.

In this study, a Cartesian-grid method based on finite volume approach is applied to simulate the ship motions in large amplitude waves. Fractional step method is applied for pressure-velocity coupling and TVD limiter is used to interpolate the cell face value for the discretization of convective term. Water, air, and solid phases are identified by using the concept of volume-fraction function for each phase. In order to capture the interface between air and water, the tangent of hyperbola for interface capturing (THINC) scheme is used with weighed line interface calculation (WLIC) method which considers multidimensional information. The volume fraction of solid body embedded in the Cartesian grid system is calculated using a level-set based algorithm, and the body boundary condition is imposed by a volume weighted formula. Numerical simulations for the two-dimensional barge type model and Wigley hull in linear waves have been carried out to validate the newly developed code. To demonstrate the applicability for highly nonlinear wave-body interactions such as green water on the deck, numerical analysis on the large-amplitude motion of S175 containership is conducted and all computational results are compared with experimental data.

Keywords : Large-amplitude ship motion(대변위 선박 운동), Finite Volume Method(FVM, 유한체적법), Cartesian-grid method(직교격자법), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학)

1. 서론

선박의 운동 문제는 조선해양 유체역학 분야의 핵심적인 연구 주제 중 하나이다. 통상 이상 유동(ideal flow)에 근거한 포텐셜 기반 수치기법들을 활용하여 선박의 운동 문제를 해석해 왔다. 아직까지도 많은 연구가 진행 중이고, 공학적인 관점에서 의미 있는 해석 결과를 제공하고 있다 (Kim & Kim, 2011). 최근 선박의 대형화와 고속화로 인하여 기존의 기법으로 해석하는 데 한계를 갖는 선수 침수 현상 등을 고려한 대변위 운동에 대한 해석이 요구되고, 또한 갑판 침수에 의한 충격하중과 같은 국부유동에 대한 해석도 선박의 안전한 설계를 위해 요구되고 있다. 이런 상황에서 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) 기법의 운동 성능에 대한 정확도 및 활용도를 검증할 필요가 있고, 실선 설계에 적용할 때의 장단점을 파악할 필요가 있다.

컴퓨터 성능의 비약적인 발전과 더불어 CFD에 대한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있으며 선박의 운동과 관련해서도 최근 다양한 시도들이 이루어지고 있다. Dommermuth, et al. (2007)은 가상경계법(IBM, immersed boundary method)과 직교격자(Cartesian grid)를 사용하여 선박의 저항 및 운동을 풀기 위한 시도를 하였고, Yang and Stern (2009) 역시 가상경계법과 유한체적법(finite volume method) 및 large eddy simulation(LES)을 이용한 난류모델을 통해 선박의 저항 문제와 입수하는 물체의 운동을 해석하였다. Hu and Kashiwagi (2007)는 constrained interpolation profile(CIP) 기법을 적용하여 관성력이 지배적인 대변위 운동문제를 주로 해석하여 가장 많은 운동 해석 결과를 보여주었다. 국내에서는 두께가 0인 물체에도 적용 가능한 가상경계법에 대한 연구 (Shin & Kim, 2006)와 2차 정확도의 Ghost-cell 가상경계법에 대한 연구 (Han & Ahn, 2011)가 있었으며, Jeong, et al. (2010)에 의해 Cartesian cut-cell 방법

을 이용한 선수부 갑판침입수에 대한 연구가 진행된 바 있다.

본 연구에서는 직교격자에 기반을 둔 유동해석 프로그램과 선박의 움직임을 처리하기 위한 가상경계법을 이용하여 대변위 운동을 해석하였다. 유한체적법에 근간하여 이산화하였고, 다단계 방법(fractional step method)을 사용하여 유체 압력과 속도를 연성하였다. 본 연구에서 사용한 가상경계법은 Hu and Kashiwagi (2007)의 방법과 유사한 방법을 사용하였다. 물체의 부피비에 따라 경계조건을 만족시키는 방법으로, 정확한 물체 표면의 위치에서 경계조건을 만족하지 않기 때문에 경계층이나 마찰저항 계산의 정확도가 다른 방법 (Dommermuth, et al., 2007; Yang & Stern, 2009)에 비해 떨어진다. 하지만, 특별한 내삽이 요구되지 않아 코딩이 단순해지고, 관성력이 지배적인 선박의 운동문제에 대해서는 정확한 결과를 제공한다.

자유표면과 물체를 구분하기 위하여 주어진 셀에서 특정 물질이 차지하는 부피 비를 나타내는 밀도 함수를 도입하였다. 물에 대한 밀도 함수는 volume-of-fluid(VOF) 계열의 기법 중 하나인 tangent hyperbola for interface capturing(THINC) 기법을 사용하여 계산하였다. 선박과 같은 복잡한 형상에 대해 각 셀에서의 부피 비를 계산하기 위하여 레벨셋(level-set) 기반 수치기법을 적용하였다. 해당 기법을 이용하여, 2차원 바지 선형의 횡동요와 Wigley III 선형의 상하동요 및 종동요의 선형운동응답에 대한 계산 및 검증 수행하였다. 또한 S175 컨테이너 선박의 상하동요 및 종동요에 대한 비선형 파랑 중 운동을 해석하였고, 이를 실험 결과와 비교하였다. 이러한 연구를 통하여 개발된 프로그램의 선박 운동 성능 해석에 대한 적용 가능성과 효율성을 파악하였다.

2. 수치기법

2.1 유체영역

비정상, 점성, 비압축성 유체에 대한 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\int_{\Gamma} (\underline{u} \cdot \underline{n}) dS = 0 \quad (1)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} dV + \int_{\Gamma} \underline{u} (\underline{u} \cdot \underline{n}) dS = \frac{1}{\rho} \left[- \int_{\Gamma} p \underline{n} dS + \int_{\Gamma} \mu (\nabla \underline{u}) \cdot \underline{n} dS + \int_{\Omega} \underline{f}_b dV \right] \quad (2)$$

여기서 Ω 는 전체 영역을 의미하고 Γ 는 영역의 경계를 나타낸다. 수치해석을 위하여 전체 영역을 직육면체의 셀로 나누면, 각각의 셀에 대해서도 위 두 식이 성립한다. 비압축성 유체에 대한 수치해석에서 압력 항에 대한 시간 적분식이 없기 때문에, 식 (2)를 통해 단순히 계산된 속도장은 연속방정식을 만족하지 않는다. 이를 해결하기 위해서는 속도와 압력간의 연성이 필요하고, 본 논문에서는 비정상 유동계산에 효율적인 다단계 방법(fractional step method)을 사용하였다 (Kim & Moin, 1985).

$$\frac{\underline{u}^* - \underline{u}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Omega_u} \sum_l \underline{u}^n (\underline{u}^n \cdot \underline{n}) \Gamma_l = \frac{1}{\rho_u} \left[\frac{1}{\Omega_u} \sum_l \mu (\nabla \underline{u}^n) \cdot \underline{n} \Gamma_l + \underline{f}_b \right] \quad (3)$$

$$\sum_l \left(\frac{1}{\rho_l} \nabla p_l^{n+1} \right) \Gamma_l = \frac{1}{\Delta t} \sum_l (\underline{u}^* \cdot \underline{n}) \Gamma_l \quad (4)$$

$$\frac{\underline{u}^{n+1} - \underline{u}^*}{\Delta t} = - \frac{1}{\Omega_u \rho_u} \sum_l p_l^{n+1} \underline{n} \Gamma_l \quad (5)$$

여기서 Ω_u 는 속도성분에 대한 검사체적의 부피를 의미하고 Γ_l 는 해당 검사체적 벽면의 넓이를 의미한다. 속도와 압력의 위 첨자는 시간 단계를, 별표는 중간 단계의 속도를 나타낸다. 대류 항과 점성 항의 시간 차분에 1차의 명시적 오일러(explicit Euler) 기법을 적용하였으며, 압력-포아송방정식 (4)에 대한 풀이에 안정된 수렴성을 보여주는 Bi-CGSTAB 기법을 이용하였다.

대류 항의 공간에 대한 이산화는 벽면에서의 플럭스를 통해 이루어지며, 식 (6)의 제한자(limiter), $\Psi(r)$ 를 이용하여 셀 벽면에서의 속도를 계산하였다 (Waterson & Deconinck, 2007). 통상 제한자는 상류 쪽 기울기에 대한 하류 쪽 기울기의 비, r 에 대한 함수이다.

$$q_e = q_C + \frac{x_e - x_w}{2} \Psi(r) \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_w \quad (6)$$

$$r = (\partial q / \partial x)_e / (\partial q / \partial x)_w \quad (7)$$

여기서 아래 첨자 e, w 는 벽면에서의 값을 의미하고, C 는 속도의 방향에 따라 정해지는 값으로 Fig. 1에 벽면에서의 속도의 방향에 따른 표기법을 나타내었다. 수치적으로 발생하는 진동현상을 제거하기 위하여 본 연구에서는 monotonized central 제한자를 사용하였다.

$$\Psi(r) = \max [0, \min (2r, 0.5(1+r), 2)] \quad (8)$$

3차원 효과를 고려하기 위하여 directional splitting 방법을 사용하였고, 압력 항과 점성 항은 통상적으로 사용되는 중심차분법 (central difference scheme)을 사용하여 이산화 하였다.

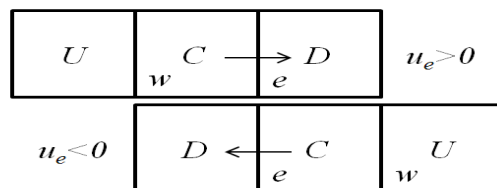


Fig. 1 Index notation for convection term

자유표면과 물체를 직교격자 내부에서 처리할 수 있도록 전체 영역을 물과 공기 및 물체를 포함하는 다상 유동 (multiphase flow)으로 간주하고 각 셀에서 밀도 함수 값(ϕ_m , $m=1$: 물, $m=2$: 공기, $m=3$: 물체)을 정의한다. 이는 각 셀에서 특정 유체 혹은 물체가 차지하고 있는 부피 비를 뜻하며, 물에 대한 밀도 함수 값은 식 (9)에 따라 변화하도록 하여 자유표면의 위치를 찾게 된다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla \phi_1 = 0 \quad (9)$$

이 식은 VOF 계열의 기법 중 하나인 tangent of hyperbola for interface capturing (THINC, Xiao, et al., 2005) 기법과 다차원 효과를 고려하는 weighed line interface calculation (WLIC, Yokoi, 2007) 기법을 사용하여 계산되었다. 셀 내부의 물에 대한 밀도 함수를 tangent hyperbolic 함수로 가정하여 벽면에서의 플럭스를 계산하는 것이 해당 기법의 기본적인 아이디어이다. 다음 장에서 설명할 물체에 대한 밀도 함수를 계산한 후, 각 셀에서의 공기에 대한 밀도 함수 값은 식 (10)을 통해 계산된다.

$$\sum_{m=1}^3 \phi_m = 1 \quad (10)$$

이상을 통해 구해진 밀도 함수 값을 이용하여 각 셀에서의 물리적인 밀도와 점성계수를 구하게 된다. 여기서 물체에 대한 밀도와 점성계수 값은 물과 동일한 값을 사용하였다.

2.2 물체에 대한 처리

물체의 경우 운동방정식을 통하여 매 시간마다 정확한 위치를 알고 있기 때문에 밀도 함수에 대한 방정식을 풀지 않고 기하학적인 조건을 이용하여 부피 비를 계산한다. 각 셀에서 물체에 대한 밀도 함수 값을 알고 있는 경우 다음 식을 이용하여 물체경계 조건을 만족시키게 된다 (Hu & Kashiwagi, 2007).

$$\underline{u}^{**} = \underline{u}^* (1 - \phi_3) + \underline{U}_{body} \phi_3 \quad (11)$$

\underline{U}_{body} 는 속도가 정의된 검사체적 중심에서 물체의 속도를 나타내고, 엇갈림격자(staggered grid)를 사용하는 경우 속도성분마다 검사체적이 다르기 때문에 각각의 경우에 대하여 밀도 함수 값을 계산해야한다. 위 식을 통해 수정된 속도 값이 압력-포아송 방정식 (4)의 우변 항에 사용된다.

물체의 밀도 함수 계산은 매 시간간격 마다 수행되어야 하는 작업이기 때문에 빠른 시간 안에 수행되어야 한다. 이를 효율적으로 처리하기 위하여 레벨셋(level set) 기반 방법을 적용하였다. 레벨셋 함수, ψ 는 경계면에서 0의 값을 갖고 내부에서는 음수, 외부에서는 양수 값을 갖는 함수이다. 이러한 성질을 갖는 대표적인 예로 거리 함수가 있으며, 만약 물체 표면에서 각 셀에 이르

는 거리에 내부인지 외부인지 판단을 해주게 되면 식 (12)를 이용하여 밀도 함수 값을 얻을 수 있다.

$$H_\alpha(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \psi < -\alpha \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\psi}{\alpha} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\psi}{\alpha}\right) \right] & \text{if } |\psi| \leq \alpha \\ 1 & \text{if } \psi > \alpha \end{cases} \quad (12)$$

물체 표면으로부터 임의의 점에 이르는 거리를 계산하기 위하여 물체 표면을 삼각형의 표면 격자로 표현하고, 이 정보를 stereolithography(STL) 포맷의 파일로 입력 받는다. 입력 받은 삼각형으로부터 3차원 공간상의 한 지점까지 거리를 계산하기 위해 해당 삼각형을 두 번의 길이가 1인 직각이등변 삼각형으로 치환하고 변환된 공간 ($s-t$)에서 거리함수 $Q(s,t)$ 를 정의하면, 최단 거리는 공간상의 미분치가 0이 되는 지점에서 발생하게 된다 (Eberly, 2008).

$$Q(s,t) = |as^2 + 2bst + ct^2 + 2ds + 2et + f| \quad (13)$$

$$\nabla Q(s,t) = 2(as + bt + d, bs + ct + e) = (0,0) \quad (14)$$

최소값이 삼각형 내부에 존재하는 경우는 위 식으로부터 얻어지는 (s,t) 값이 최소거리가 되는 점이 되지만, 다른 영역에 존재하게 되면 구해진 (s,t) 값이 아닌 미분값의 등고선이 삼각형과 만나는 점이 최소거리가 되는 점이다. 최소거리가 되는 점과 공간상의 임의의 점을 잇는 벡터와 삼각형의 법선 벡터간의 내적을 통해 해당 점 위치의 내외부를 판단할 수 있다.

선체에 작용하는 힘과 모멘트는 다음 식 (Hu & Kashiwagi, 2004)을 이용하여 계산되며, 본 연구에서는 압력에 의한 성분만 고려하였다.

$$\vec{F} = - \iiint_V \nabla p \phi_3 dV \quad (15)$$

$$\vec{M} = - \iiint_V (\vec{x} - \vec{x}_{cg}) \times \nabla p \phi_3 dV \quad (16)$$

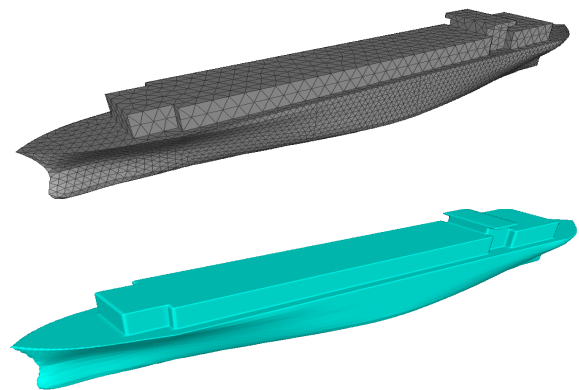


Fig. 2 Triangular surface mesh (upper) and calculated density function (lower) of S175 containership

Fig. 2는 앞서 설명한 방법을 S175 컨테이너선형에 적용한 결과를 나타내고 있다. 삼각형 표면 격자를 통해 계산된 물체의 밀도 함수 값이 주어진 형상을 거의 정확하게 묘사함을 알 수 있다. 정량적인 평가를 위해 Table 1에 나타난 각각의 격자 시스템에 대해서 선형 복원력 계수와 배수량을 계산하였고, 실험에서 주어진 값과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Grid 3 이상의 조밀한 격자에 대해서는 계산된 값과 주어진 값 (Kim & Kim, 2011)의 차이가 1% 이내로 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Computation conditions for grid convergence test

Grid Index	$N_x \times N_y \times N_z$	$\Delta x_{min}/L$	$\Delta y_{min}/L$	$\Delta z_{min}/L$
Grid 1	153×113×107	0.040	0.0060	0.0040
Grid 2	202×117×118	0.030	0.0055	0.0030
Grid 3	264×121×122	0.020	0.0050	0.0020
Grid 4	264×121×131	0.020	0.0050	0.0015
Grid 5	284×121×131	0.018	0.0050	0.0015

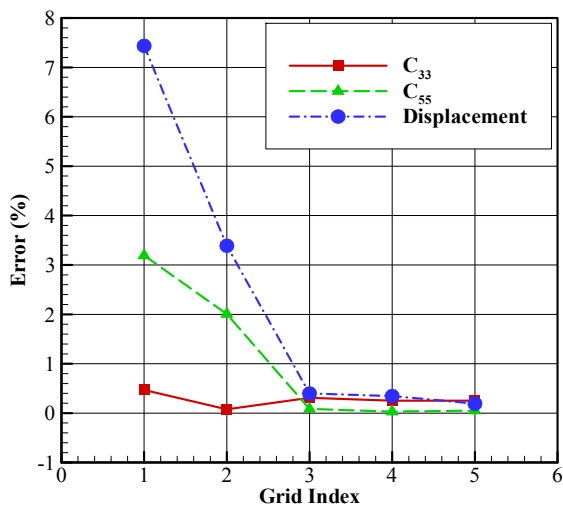


Fig. 3 Grid convergence test for linear restoring coefficients (C_{33} and C_{55}) and displacement

3. 수치해석결과

3.1 2차원 바지선형

3차원 선박에 대한 운동 계산에 앞서 2차원 바지 선형에 대한 계산을 수행하였다. 이 모델에 대한 실험은 한국해양연구원에서 수행되었으며, 상부 구조물 형상 및 파고에 따른 비선형 횡운동을 계측하여 갑판 침수가 부유체의 운동에 주는 영향을 검토하고 이를 개발된 프로그램의 검증 자료로 활용하였다.

Fig. 4는 실험에 사용된 모델의 제원을 나타내고 있다. 갑판 침수 영향을 관찰하기 위하여 낮은 건현을 갖는 모델이 사용되었

다. 해당 모델의 횡운동 공진 주기는 1.5초($\omega(L/g)^{1/2}=1.036$)이고, 무게중심은 물체 바닥으로부터 0.175m 위에 위치하며 회전반경 k_{xx} 는 0.32114m 이다. 선형운동응답과 갑판 침수가 발생하는 파고인 $A/L=1/60, 1/30, 1/15$ 의 세 가지 경우에 대하여 실험이 수행되었다.

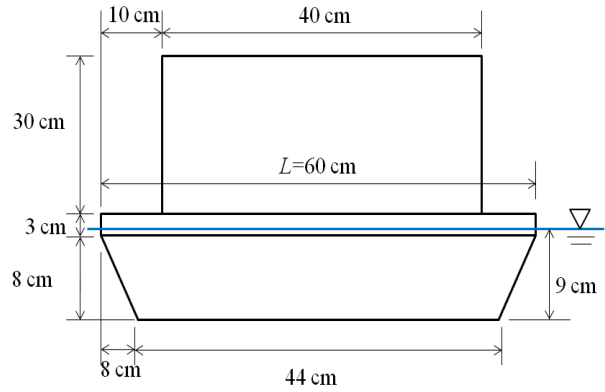


Fig. 4 Schematic view of barge model

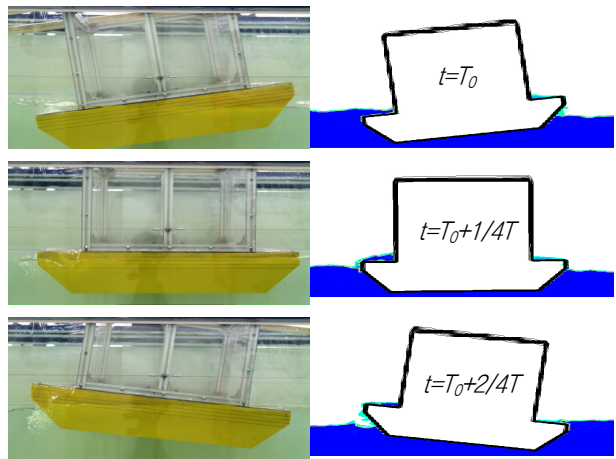


Fig. 5 Snapshots for two-dimensional barge model ($A/L=1/30, \omega(L/g)^{1/2}=1.036$)

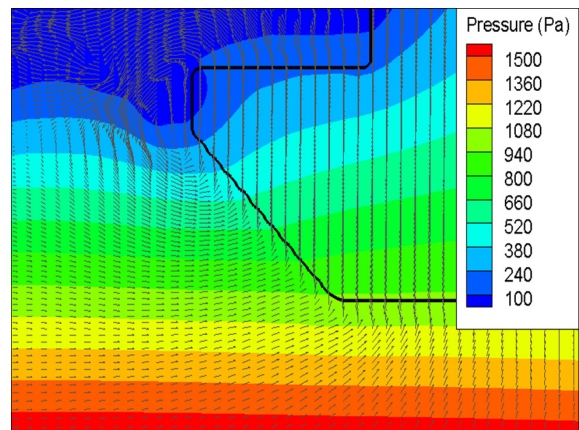


Fig. 6 Instantaneous velocity vector and pressure field around the barge model: $t=T_0+1/4T$

계산에 사용된 격자는 파장에 따라 다르지만, 길이방향으로 400~900개, 높이 방향으로 190개의 격자가 사용되었다. 물체 근처와 자유표면에 격자를 집중 시켰으며 시간 간격은 파장의 1000분의 1을 초기 값으로 주고 CFL 값을 0.2로 주어 유체 속도에 따라 변화하도록 하였다. A/L 의 값이 1/30이고 공진 주파수와 같은 파주파수로 입사파를 만든 경우의 시간에 따른 물체의 움직임과 물체 주변의 자유표면 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 왼쪽 열은 실험 결과를 오른쪽 열은 계산 결과를 나타내며, 계산 결과와 실험 모두에서 갑판 침수가 발생하는 것을 알 수 있고 물체의 운동 또한 서로 유사한 것을 확인 할 수 있다. 하지만 국부적인 유동의 형상이나 실험에서 나타나는 많은 기포의 발생 등은 계산 결과와 차이가 있다. Fig. 6은 물체 주변의 속도 벡터와 입력장을 나타내며, 물체가 상승하면서 주변 유동 역시 따라 올라가는 것을 볼 수 있다. 또한, 물체 주변에서 압력장이 연속적으로 계산되는 것을 확인 할 수 있다.

운동 크기에 대한 정확한 비교를 위하여 입사파고와 파주기를 바꿔가며 운동응답을 계산하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 갑판 침수가 발생함에 따라 최대 운동응답의 위치가 저주파 쪽으로 약간 이동하는 경향을 확인 할 수 있으며 응답의 크기 또한 작아지는 것을 알 수 있다. 계산 결과 역시 이러한 경향을 보여주고 있지만 최대 운동응답 부근의 크기가 실험보다 작게 계산되었다. 이는 강한 비선형 운동으로 인해 수치적인 감쇠가 다른 영역에 비해 크게 나타난 것으로 해석된다. 하지만, 최대 운동응답에서 보이는 약간의 차이를 제외하면 실험 결과와 계산 결과가 비교적 일치된 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

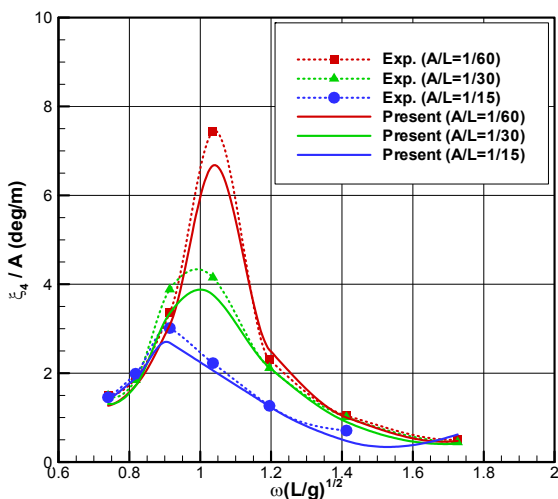


Fig. 7 Roll motion transfer function for barge model with different wave amplitudes

3.2 Wigley III 선형

선박에 대한 비선형 운동 계산에 앞서, 본 연구에서 개발된 프로그램의 검증에 위해 Wigley III 선형에 대해 선형(linear) 운동응

답을 계산하여 Journee (1992)의 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 8은 상하동요 방향에 대한 유체력 시계열을 나타내고 있으며, 통상 직교격자를 이용한 움직임은 물체 계산에서 나타나는 압력장의 비물리적인 변동 없이 균일한 유체력이 얻어 지는 것을 확인 할 수 있다. 파장이 선박의 길이와 같은 경우와 두 배인 경우에 대한 파고의 등선을 Fig. 9에 나타내었다. 3차원 공간상에 계산된 물에 대한 밀도 함수 값을 이용하여 파고를 계산하였고, 이 때문에 물체 주변에서는 정확한 파고를 나타내지는 않는다. 선박의 길이와 파장의 길이가 같은 경우 운동하며 전진하는 선박에 의해 교란된 파의 형태가 선명하게 나타나는 것을 알 수 있고, 파 길이가 두 배인 경우에는 교란되는 파 성분이 앞선 경우에 비해 많이 감소하는 것을 알 수 있다.

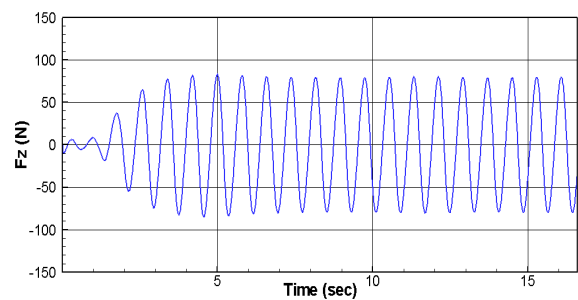


Fig. 8 Time signal of heave force, Wigley III (Fn=0.3, $\lambda/L=1.0$)

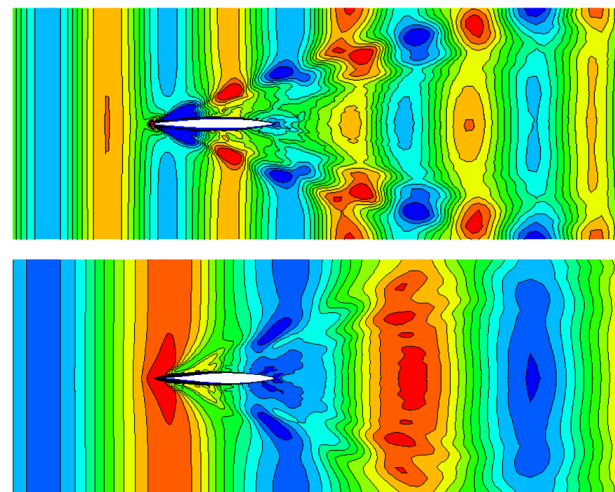
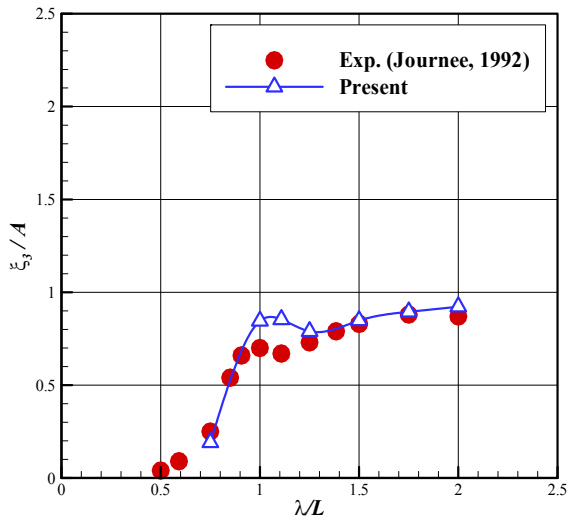
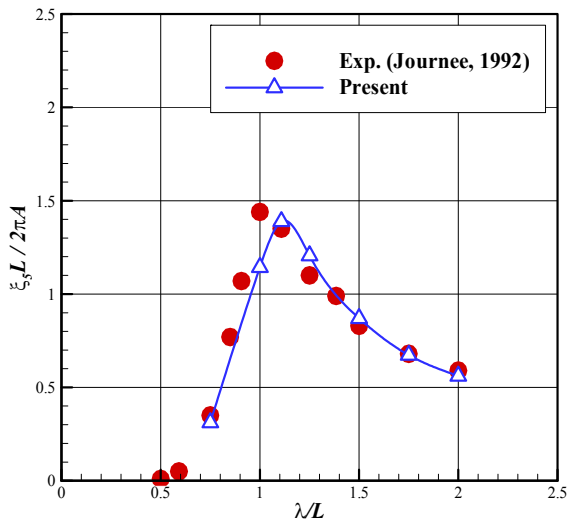


Fig. 9 Wave contours for two different wave lengths (Fn=0.3, $\lambda/L=1.0$ (upper), $\lambda/L=2.0$ (lower))

Fig. 10 과 11은 각각 Froude number(Fn)의 값이 0.2, 0.3인 경우에 대하여 상하동요와 종동요의 운동응답 크기를 나타낸 것이다. 입사파고의 크기는 실험과 동일하게 $A/L=0.0063$ 으로 설정하였다. 파가 전파되는 후방에서 반사파를 제거하기 위해 감쇄영역을 두었고, 측면은 벽면 경계조건으로 계산하였다. 선박의 전진속도가 증가함에 따라 최대 운동의 위치가 장파 쪽으로 이동하는 경향이 나타남을 확인 할 수 있다. 또한 상하동요



(a) Heave

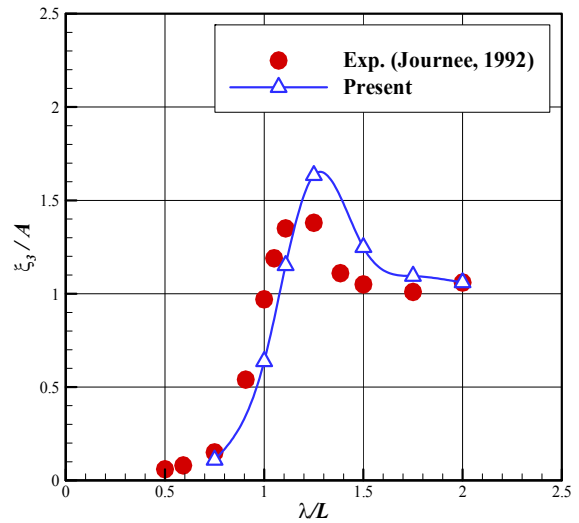


(b) Pitch

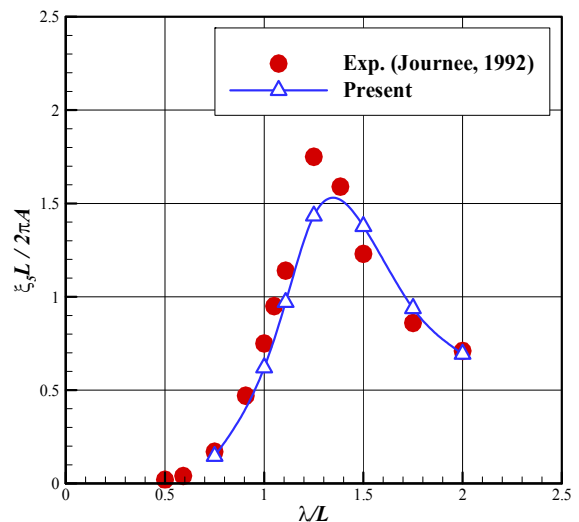
Fig. 10 Motion transfer function of Wigley III hull (Fn=0.2, A/L=0.0063)

의 경우, 장파로 변화함에 따라 운동의 크기가 1로 수렴하는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 실험과 잘 일치함을 알 수 있다.

수치계산에서 구해진 최대 운동응답의 크기가 실험 결과와 약간의 차이를 보이는데, 이러한 차이는 대부분의 경우 격자와 밀접한 관계를 갖고 있다. 주어진 선형파 조건 (A/L=0.0063)에서는 낮은 파고에 비하여 파장이 길기 때문에 셀이 갖는 종횡비(aspect ratio)가 매우 커지는 영역이 발생하게 되며, 이는 수치적인 불안정의 원인이 된다. 이러한 제약 조건을 해결하기 위해 추후 쿼드트리(quadtrees) 자료 구조를 이용한 적응격자(adaptive mesh) 등의 방법을 적용할 필요가 있다.



(a) Heave

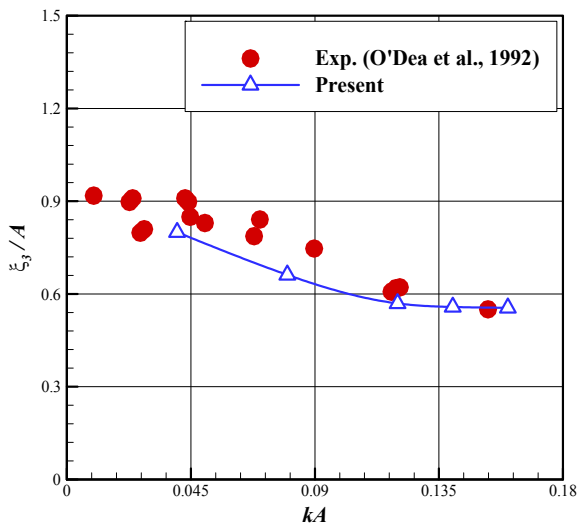


(b) Pitch

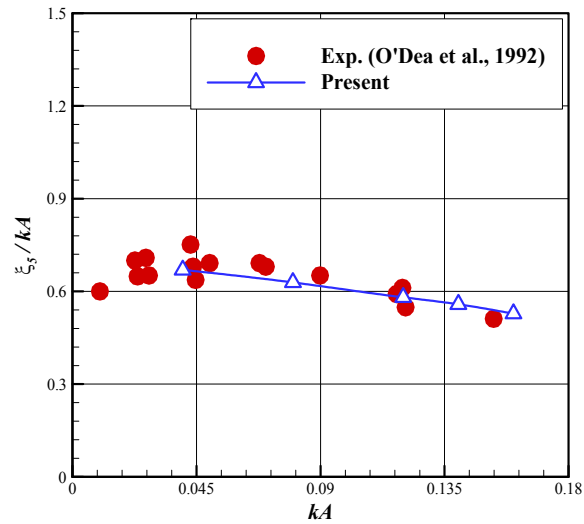
Fig. 11 Motion transfer function of Wigley III hull (Fn=0.3, A/L=0.0063)

3.3 S175 컨테이너선

Fig. 12에서는 S175 컨테이너선의 상하동요 및 종동요의 운동응답을 파고에 따라 O'Dea, et al.(1992)의 실험 결과와 비교하였다. 상하동요 및 종동요를 제외한 나머지 운동은 구속된 상태로 계산하였다. 시간간격은 파주기의 1000분의 1로 초기 값을 주었고 CFL 값은 0.2로 주었다. 상하동요의 경우 약간 작은 운동응답을 보이는데 반해 종동요의 경우는 실험과 비슷한 운동응답 크기를 보여줬다. 하지만 두 경우 모두 실험 결과에서도 나타나듯 파고가 커질수록 운동응답이 작아지는 유사한 경향을 보여주었다.



(a) Heave



(b) Pitch

Fig. 12 Comparisons of the motion transfer function for S175 containership ($F_n=0.2$, $\lambda/L=1.0$)

입사파 주기의 4분의 1 간격으로 시간에 따른 선박의 운동과 자유표면의 형상을 Fig. 13에 나타내었다. kA 값은 0.16이고 파장은 선박의 길이와 같은 경우이며, $F_n=0.2$ 의 전진속도를 갖는 경우이다. 비교적 높은 파고의 입사파와 선박의 상호작용을 성공적으로 계산할 수 있었고 쇄파(breaking wave)와 같은 비선형성이 강한 현상도 발생하였다. 선수부 갑판 침수 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있지만 앞선 2차원 비선형의 경우와 달리 운동응답에 대한 갑판 침수의 영향은 크지 않았다. 이는 갑판에 올라온 유체의 관성력이 선박의 관성에 비해 무시할 정도로 작기 때문이며, 이러한 갑판 침수 현상이 발생하는 경우에는 운동응답보다 국부적인 충격하중 해석이 더욱 중요할 것이다.

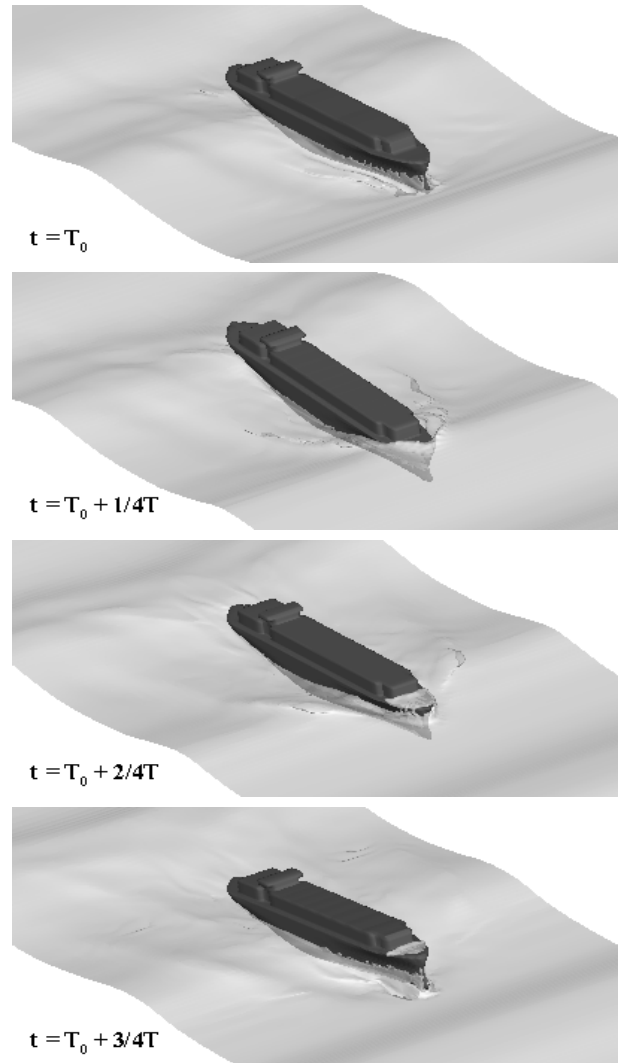


Fig. 13 Snapshots of iso-surfaces ($\phi_1=0.5$, $\phi_3=0.25$) for S175 containership ($F_n=0.2$, $\lambda/L=1.0$, $kA=0.16$)

4. 결론

본 연구에서는 직교격자 기반의 수치기법을 이용하여 선박의 대변위 운동해석을 위한 프로그램을 개발하고 바지 선형, Wigley III 선형, S175 컨테이너선에 대한 선형 및 비선형 운동 해석을 수행하였다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 직교격자 내부에서 선박과 같은 복잡한 형상을 갖는 물체를 다루기 위하여 레벨셋 기반의 수치기법을 적용하였고, 임의의 움직임을 효율적으로 다룰 수 있음을 확인하였다.
- 2차원 비선형의 경우 갑판 침수로 인하여 횡동요의 최대 응답이 나타나는 주파수가 공진 주파수 보다 작은 영역으로 이동하였고, 파고가 증가함에 따라 횡동요 운동의 응답 크기가 감소하였다.

- Wigley III 선형에 대한 선형운동응답 계산은 실험과 유사한 결과를 주었으며, 이를 통해 개발된 프로그램이 선박의 운동 특성을 추정하는 데 활용 될 수 있음을 검증하였다.
- S175 컨테이너선의 경우 파고가 증가함에 따라 갑판 침수 현상이 나타났고 운동응답의 크기도 감소하는 경향이 보였지만, 비직선형에 비해 갑판 침수의 영향이 미미함을 알 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 프로그램이 추후 다양한 부유체 운동 문제를 해결하는 데 활용되기 위해서는 파고에 비해 파장이 큰 경우에 대한 격자 생성과 이에 적합한 수치기법의 개발, 엄밀한 물체 경계조건 만족을 통한 점성유동 해석 그리고 설계 단계에 적용하기 위한 계산 효율성 향상 등에 관한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원 주요사업인 “해양구조물의 이송·설치를 위한 작업성능 평가기술 개발” 위탁과제 및 LRET 기금 연구센터 지원의 연구과제 결과임을 밝히며, 지원에 감사를 드립니다. 또한 서울대학교 공학연구소(ERI)와 해양시스템공학연구소(RIMSE)의 행정지원에도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Dommermuth, D.G. et al., 2007. An Application of Cartesian-Grid and Volume-of-Fluid Methods to Numerical Ship Hydrodynamics. *9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Ann Arbor, Michigan, 5-8 August 2007.

Eberly, D., 2008. *Distance between point and triangle in 3D*. [Online] (Updated 14 August 2012) Available at: <http://www.geometrictools.com> [Accessed 2 December 2010].

Han, M.R. & Ahn, H.T., 2011. Vortex-Induced Vibration of Simple Slender Structure Using Cartesian Mesh. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.260-266.

Hu, C. & Kashiwagi, M., 2004. A CIP-Based Method for Numerical Simulations of Violent Free-Surface Flows. *Journal of Marine Science and Technology*, 9(4), pp.143-157.

Hu, C. & Kashiwagi, M., 2007. Numerical and Experimental Studies on Three-Dimensional Water on Deck with a Modified Wigley Model. *9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Ann Arbor, Michigan, 5-8 August 2007.

Jeong, K.L. Lee, Y.G. & Kim, N.C., 2010. A Fundamental Study for the Numerical Simulation

Method of Green Water Occurrence on Bow Deck. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.188-195.

Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves*, Delft University of Technology Report No 0909.

Kim, J. & Moin, P., 1985. Application of a fractional step method to incompressible Navier-Stokes equations. *Journal of Computational Physics*, 59, pp.308-323.

Kim, K.H. & Kim, Y., 2011. Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method. *Ocean Engineering*, 38(13), pp.1357-1367.

O’Dea, J. Powers, E. & Zselecsky, J., 1992. Experimental determination of non-linearities in vertical plane ship motions. *Proceedings of the 19th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea, 24-28 August 1992.

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.

Waterson, N.P. & Deconinck, H., 2007. Design principles for bounded higher-order convection schemes – a unified approach. *Journal of Computational Physics*, 224(1), pp.182-207.

Xiao, F. Honma, Y. & Kono, T., 2005. A Simple Algebraic Interface Capturing Scheme Using Hyperbolic Tangent Function. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 48(9), pp.1023-1040.

Yang, J. & Stern, F., 2009. Sharp Interface Immersed-Boundary / Level-Set Method for Wave-Body Interactions. *Journal of Computational Physics*, 228(17), pp.6590-6616.

Yokoi, K., 2007. Efficient Implementation of THINC Scheme: A Simple and Practical Smoothed VOF Algorithm. *Journal of Computational Physics*, 226(2), pp.1985-2002.



양경규

남보우

이재훈

김용환