

파랑 중 선박의 2자유도 운동해석을 위한 중첩격자 기반의 수치해법

허재경,¹ 옥유빈,² 박종천,^{*3} 정세민,⁴ 秋元博路⁵

¹Software, DNV Korea

²현대중공업 운항성능연구소

³부산대학교 조선해양공학과

⁴조선대학교 선박해양공학과

⁵오사카대학 아시아인재육성연구교육거점

OVERSET-GRID SIMULATION TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF 2-DOF SHIP MOTIONS IN WAVES

J.-K. Heo,¹ Y.-B. Ock,² J.-C. Park,^{*3} S.-M. Jeong⁴ and H. Akimoto⁵

¹Software, DNV Korea, Korea

²Dept. of Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Korea

³Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Korea

⁴Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Korea

⁵Center for the advancement of research and education exchange networks in Asia, Osaka University, Japan

This paper introduces a computational method for analysis of the 6-DOF motions of a ship in waves using an overset grid technique which consists of inner and outer domains for representing body motions and numerical wave tank, respectively. High order interpolation scheme is employed to increase numerical accuracy over the interface where physical values, such as velocities and pressure, interact between the inner and outer domains. The numerical schemes and algorithm are addressed in the present paper. An application to motion of KCS container carrier in head waves is presented, and the comparison of responses on heave and pitch motions shows good agreement with those of model tests.

Key Words : 선체 운동(Ship motions), 중첩 격자(Overset grid), 전산유체역학(CFD), 자유표면 유동(Free-surface flows), 입사파(Incident waves)

1. 서 론

선박 및 해양플랜트는 20년 이상의 설계수명 동안 거친 해상에서 승객과 화물을 운송하거나 원유와 가스를 생산해야 한다. 끊임없는 파도로 인해 발생하는 선체 운동은 승조원의 안전과 승선감 및 작업성을 저하시킬 뿐만 아니라 선체 구조에 치명적인 손상을 가져올 수 있다. 따라서, 선체의 운동 및 파랑 하중은 설계단계에서 해석적인 방법으로 엄밀히 추정하거나 모형시험을 통해 검증을 필요로 하고 있다.

선체 운동 및 파랑하중에 대한 해석은 주로 포텐셜 이론에 기초한 Strip 방법[1]이나 Panel 방법[2]에 의해 이뤄지고 있다. 이들 방법은 대부분 주파수 영역에서 계산되며, 짧은 계산시간에 비교적 높은 정확도의 결과를 제공한다. 그러나, 대부분 선형이론에 기초하고 있어서 대 진폭 파도로 인한 비선형 문제 또는 점성의 영향이 큰 문제에는 정확도가 떨어지는 한계를 가지고 있다.

컴퓨터의 연산능력 및 CFD(Computational Fluid Dynamics) 기술의 향상과 함께 부유체의 파랑 중 운동해석에 대해 CFD를 이용한 직접 해석이 적극적으로 시도되고 있다. 파랑 중 선박이나 해양플랜트에 대한 운동을 해석하기 위해서는 특히 자유표면 처리 기법과 운동해석 기법의 정확도 및 효율성 확보가 중요하다.

종래의 자유표면 처리기법으로는 자유표면의 운동학적 경

Received: June 9, 2015, Revised: August 20, 2015,

Accepted: August 20, 2015.

* Corresponding author, E-mail: jcpark@pnu.edu

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.3.20>

© KSCFE 2015

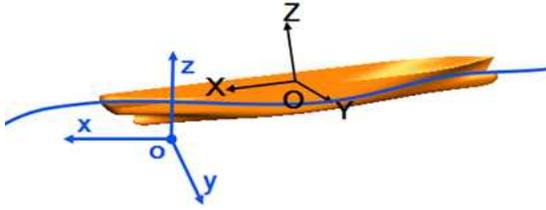


Fig. 1 Coordinate system

계조건에 따라 격자를 이동시키는 방법이 사용되었으나, 최근에는 대부분 1층(1-layer)류 또는 2층(2-layer)류에 대한 스칼라 함수를 이용하여 자유표면을 포착해내는 방법이 주로 사용되고 있다.

한편, 선체 운동에 대한 처리기법으로는 선체의 변위에 따라 공간격자를 매 계산시간 단계마다 재배치시키는 방법[3], 물체를 포함한 격자계 전체를 운동시키는 MRF(Moving Reference Frame) 방법[4], 중첩 격자(Overset grid) 방법[5,6,7] 등이 사용되고 있다. 공간격자를 재배치하는 방법은 격자계의 질을 일정한 수준으로 유지하기 어려우므로 대 진폭의 운동 해석에 제한이 따른다. MRF 방법은 계산의 안정성은 높으나, 선체운동으로 인하여 계산영역이 기울어지는 경우에는 자유수면 근처에서 격자의 조밀도가 낮아지고, 이로 인해 정확한 파고의 계산이 어려워진다. 또한, 임의의 경계조건을 적용하기 어려우며, 1척의 선체에 대한 운동해석만 가능한 단점을 가지고 있다. 이에 비해 중첩격자계를 이용하는 방법은 대 진폭 운동, 복수의 선체 운동, 임의의 경계조건 적용 등 매우 폭넓게 활용될 수 있다. 중첩격자계 중 가장 대표적이라 할 수 있는 Chimera 기법[8]은 항공우주 분야에서 적용된 이후 조선·해양 분야에까지 적용되고 있다.

본 연구에서는 선박의 파랑 중 6자유도 운동해석이 가능한 중첩격자계 기반의 CFD 해석 기법을 개발하고, 이를 이용하여 일정한 속도로 진행되는 KCS(KRISO Container Ship)에 대한 2자유도 운동 시뮬레이션을 수행하고 실험결과[9]와 비교하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 좌표계

선체의 6자유도 운동을 시뮬레이션 하기 위하여 Fig. 1과 같이 선체고정좌표계($O-XYZ$)와 공간고정좌표계($o-xyz$)의 두 좌표계를 사용한다. 각 좌표계에서의 원점은, 선체고정좌표계에서는 선체의 중심(Center of gravity)에, 공간고정좌표계에서는 수평면($z=0$)과 일치하도록 하고 z 축을 연직상방향을 향하도록 각각 정의한다.

두 좌표계간의 변환은 각 축을 중심으로 하는 회전각인 오일러 각(Φ, Θ, Ψ)을 갖는 오일러 변환행렬(E)에 의해 다음과 같이 좌표 변환된다[6,10].

$$(x, y, z) = E(\Phi, \Theta, \Psi)^T \times (X, Y, Z) \tag{1}$$

$$E(\Phi, \Theta, \Psi) = \begin{pmatrix} \cos\Theta\cos\Psi & \cos\Theta\sin\Psi & -\sin\Theta \\ \sin\Phi\sin\Theta\cos\Psi - \cos\Phi\sin\Psi & \sin\Phi\sin\Theta\sin\Psi + \cos\Phi\cos\Psi & \sin\Phi\cos\Theta \\ \cos\Phi\sin\Theta\cos\Psi + \sin\Phi\sin\Psi & \cos\Phi\sin\Theta\sin\Psi - \sin\Phi\cos\Psi & \cos\Phi\cos\Theta \end{pmatrix} \tag{2}$$

2.2 지배 방정식

비압축성 난류 유동장에 대한 지배방정식으로 연속방정식과 RaNS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하며, 이를 시간에 대해 변화하는 표면적 벡터 $S(t)$ 를 갖는 검사체적 $V(t)$ 에 대해 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} + \oint_{S(t)} dS \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{v}) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} \mathbf{u} dV = \oint_{S(t)} dS \cdot \bar{\mathbf{T}} + \int_{V(t)} \mathbf{K} dV \tag{4}$$

$$\bar{\mathbf{T}} = -(\mathbf{u} - \mathbf{v})\mathbf{u} - P\bar{\mathbf{I}} + \frac{1}{Re} [\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T] - \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} \tag{5}$$

여기서, t 는 시간, \mathbf{u} 는 속도 벡터, dS 는 요소 표면적 벡터, dV 는 요소 체적, \mathbf{v} 는 검사체적의 운동에 따른 표면적 벡터의 이동 속도 벡터, $\bar{\mathbf{T}}$ 는 응력 텐서, \mathbf{K} 는 선체고정좌표계의 병진·회전운동에 기인하는 관성력 성분으로 구성되며 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{K} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} - \frac{\partial \mathbf{V}_c}{\partial t} \tag{6}$$

여기서, $\boldsymbol{\omega}$ 는 선체고정좌표계에서 정의되는 선체중심 주위의 각속도 벡터, \mathbf{r} 은 선체고정좌표계에서의 위치벡터, \mathbf{V}_c 는 선체중심의 병진속도벡터를 각각 나타낸다. 우변의 각 항은, 순서대로 Coriolis력, 원심력, 각속도에 의한 관성력 및 병진가속도에 의한 기여를 나타낸다.

그밖에, $\bar{\mathbf{T}}$ 는 항등텐서, Re 는 레이놀즈 수, ∇ 은 구배연산자, $(\cdot)^T$ 는 전치(Transpose) 연산자, $-\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ 는 레이놀즈 응력이다. 또한 P 는 정수압이 포함되지 않은 무차원 압력이며 다음과 같이 정의된다.

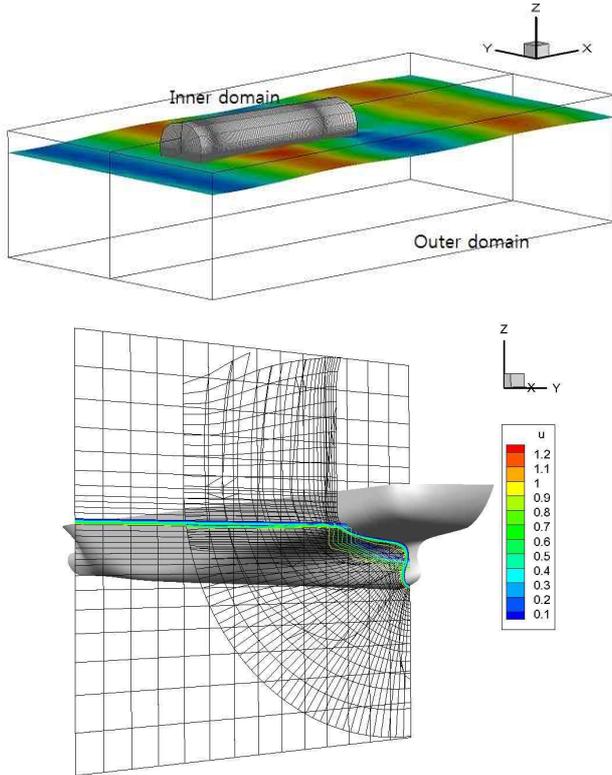


Fig. 2 Computational domains of overset grid method

$$P = \frac{p}{\rho} + \frac{z}{F_n^2} \quad (7)$$

여기서, p 는 압력, z 는 공간고정좌표계의 연직 상방향의 자유표면 위치, F_n 은 Froude 수를 나타낸다.

2.3 수치 기법

중첩격자계를 사용하는 과량 중 선체운동 해석 기법은 Fig. 2에서와 같이 전체 계산영역을 수치과량수조(Numerical wave tank)의 역할을 담당하는 외부영역과 선체의 운동을 담당하는 내부영역으로 구분한다. 두 영역에서는 전술한 지배방정식이 유한체적법으로 각각 이산화되며, 매 시간 스텝의 경계조건을 이용하여 풀리게 된다[4,6,11].

대류항의 이산화에는 격자의 크기를 고려한 3차 정확도의 MUSCL 법[12], 그 외에는 2차 정확도의 중심차분법을 사용하였다. 또한 시간적분에는 2차 정확도의 양해법을 적용하였다. 속도와 압력은 MAC(Marker and Cell) 방법에 따라 연성되며, 내부영역과 외부영역에 대한 Poisson 방정식을 SOR(Successive Over Relaxation) 법의 반복해법에 의해 각각 계산하여 연속방정식을 만족시킨다.

난류모델로는 BL[13] 대수 모델과 DSGS(Dynamic Sub-grid

Scale) 모델[14]을 혼합한 혼합형 난류모델(Hybrid turbulence model)을 적용하였다. 상대적으로 경계층 두께가 작은 선체의 전반부에는 BL 모델을, 그리고 난류의 경계층 두께가 갑자기 커지는 반류 영역인 후반부에서는 BL 모델은 와동점성 계수 ν_τ 를 과잉으로 산정하는 경향이 있으므로 다음과 같이 DSGS 모델을 혼합하였다.

$$\nu_\tau = \begin{cases} 0 & (x < x_{FP}) \\ \nu_\tau^{BL} & (x_{FP} < x < x_{MID}) \\ \beta \nu_\tau^{BL} + (1 - \beta) \nu_\tau^{DSGS} & (x_{MID} < x < x_{AP}) \\ \nu_\tau^{DSGS} & (x_{AP} < x) \end{cases} \quad (8)$$

단, ν_τ^{BL} 과 ν_τ^{DSGS} 는 각각 BL과 DSGS 모델로부터 얻어진 와동점성 계수이며, x_{FP} , x_{MID} , 그리고 x_{AP} 는 선수, 선체중앙, 그리고 선미의 x 방향 좌표를 각각 나타낸다. 또한 β 는 선체의 중단면적 $s(x)$ 을 이용하여 $\beta = \sqrt{s(x)/s(x_{MID})}$ 로 구할 수 있다. 즉, β 가 1이면 선체 중앙이며 선미에서는 0을 나타낸다.

자유표면의 운동학적 조건은 0부터 1의 범위를 가지는 밀도함수(Marker Density Function)[15,16] M_ρ 의 수송방정식 (9)를 풀어 만족시켜 준다.

$$\int_{V(t)} \frac{\partial M_\rho}{\partial t} dV = M_\rho \oint_{S(t)} d\mathbf{S} \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{v}) - \oint_{S(t)} d\mathbf{S} \cdot M_\rho (\mathbf{u} - \mathbf{v}) = 0 \quad (9)$$

밀도함수의 유속(Flux) 계산에 필요한 계면형상의 특성함수(χ)로서는 식 (10)과 같은 THINC(Tangent Hyperbola for Interface Capturing) 스킴[17]을 사용하였다.

$$\chi_{x,i} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \alpha_\chi \tanh \left[\beta \left(\frac{x - x_{i-1/2} - \tilde{x}_i}{\Delta x} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

여기서 α_χ 와 β 는 각각 경계면의 방향과 hyperbolic tangent 함수의 변화율(기울기)을 의미하며, α_χ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\alpha_\chi = \begin{cases} 1 & (\text{if } \mathbf{n}_{x,i} \geq 0) \\ -1 & (\text{if } \mathbf{n}_{x,i} < 0) \end{cases} \quad (11)$$

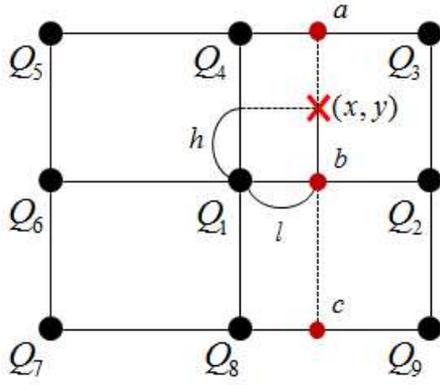


Fig. 3 Definition for quadratic interpolation

단, 1차원 법선벡터 $\mathbf{n}_{x,i} = M_{\rho i+1} - M_{\rho i-1}$ 이다. β 의 경우, 한 개의 격자내에서 hyperbolic tangent 함수가 0 ~ 1부근까지 완만하게 변화하도록 3.5를 사용하였다.

본 연구에서는, 자유표면의 실제형상을 보다 정확하게 표현하게 하기 위하여 주변의 밀도함수 값으로부터 계산된 계면의 각 방향 면법선(surface normal) 값을 이용하여 특성함수(본 논문에서는 THINC 스킴)에 가중치를 부여하고, 차원분할(dimensional splitting)을 통해 다차원 문제에도 쉽게 적용이 가능한 THINC-WLIC(Weighted Line Interface Calculation)법[18,19]을 채택하였다.

최종적으로 밀도함수의 유속은 다음과 같이 정리된다.

$$F_{i+1/2} = - \int_{x_{1+1/2}}^{x_{1+1/2} - v_{i+1/2}\Delta t} \omega_{iup(x)} \chi_{iup(x)} dx \quad (12)$$

여기서, ω 는 가중치이며, 아래첨자 iup 은 상류쪽 격자 점을 나타내며, 격자의 경계($i+1/2$)에서의 유속($v_{i+1/2}$)이 0보다 크거나 같은 경우 i , 작은 경우 $i+1$ 이다.

자유표면 상부 영역에서의 압력과 속도는 자유표면의 역학적 조건을 만족하도록 외삽한다.

이상과 같은 수치기법으로 이산화된 내부 영역과 외부영역은 매 계산시간마다 속도, 압력, 밀도함수와 같은 물리량들의 정보를 상호교환하게 된다. 물리량의 교환은 계산의 안정성과 정확도 측면에서 신중한 선택이 요구되며, 본 계산에서는 2차 정확도의 보간법을 사용하였다. Fig. 3의 (x, y) 지점의 물리량은 주변의 물리량 정보로부터 다음과 같이 보간된다.

$$Q(x, y) = Q_b + (Q_a - Q_c) \frac{h}{2} + (Q_a - 2Q_b + Q_c) \frac{h^2}{2} \quad (13)$$

여기서,

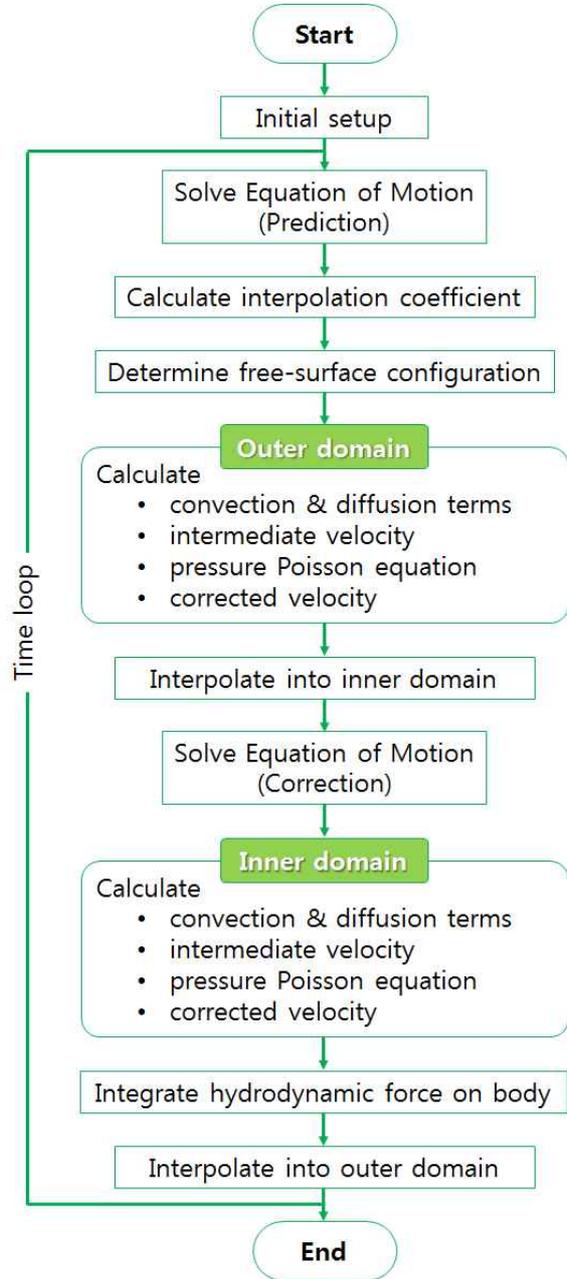


Fig. 4 Computational procedure

$$Q_a = Q_4 + (Q_3 - Q_5) \frac{l}{2} + (Q_3 - 2Q_4 + Q_5) \frac{l^2}{2}$$

$$Q_b = Q_1 + (Q_2 - Q_6) \frac{l}{2} + (Q_2 - 2Q_1 + Q_6) \frac{l^2}{2}$$

$$Q_c = Q_8 + (Q_9 - Q_7) \frac{l}{2} + (Q_9 - 2Q_8 + Q_7) \frac{l^2}{2}$$

이며, h 와 l 은 각각 연직과 수평방향의 격자비를 나타낸다. 3차원으로서의 확장은 동일한 방법으로 수행할 수 있다.

선박의 운동을 표현하기 위해 외부 및 내부영역에는 Fig. 1에 나타내는 바와 같이 각각 공간고정 좌표계와 물체고정 좌표계가 사용되며, 상대 좌표계의 물리량 교환은 오일러 행렬 변환을 통해 이루어진다.

자유표면 근방의 처리방법으로, 자유표면 상에서 점성 및 표면장력을 무시하여 수면 위로 속도를 외삽하였고, 이를 이용하여 상술한 방법을 적용하였다.

2.4 선체 운동

선체고정좌표계에서의 선체운동은 다음의 운동방정식을 이용하여 계산된다.

$$m \left(\frac{d^*}{dt} \mathbf{V}_c + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_c \right) = \mathbf{F} \quad (14)$$

$$\frac{d^*}{dt} \mathbf{h} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{h} = \mathbf{M} \quad (15)$$

여기서, m 은 물체의 질량, 미분연산자 d^*/dt 는 물체고정 좌표계에서의 시간미분, \mathbf{V}_c 는 선체 중심에서의 속도, $\mathbf{h} (= \mathbf{I}_0 \cdot \boldsymbol{\omega})$ 는 각운동량을 각각 나타낸다. 또한 \mathbf{F} 와 \mathbf{M} 는 식 (16), (17)과 같이 선체표면에 작용하는 응력으로부터 적분된 유체력과 각운동량을 나타낸다.

$$\mathbf{F} = \int \left\{ -P\bar{\mathbf{I}} + \left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \right\} \cdot d\mathbf{s} \quad (16)$$

$$\mathbf{M} = \int \mathbf{r} \times \left\{ -P\bar{\mathbf{I}} + \left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \right\} \cdot d\mathbf{s} \quad (17)$$

선속도와 각속도의 변환은 오일러 좌표 변환을 통한 좌표계간 벡터의 변환에 의해 각각 구해진다.

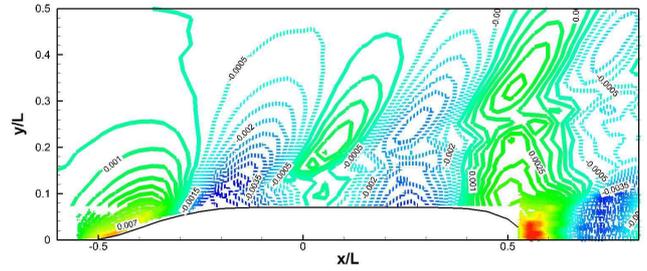
Fig. 4는 계산의 흐름을 나타낸다.

3. 선수파 중 KCS 선형의 운동 해석

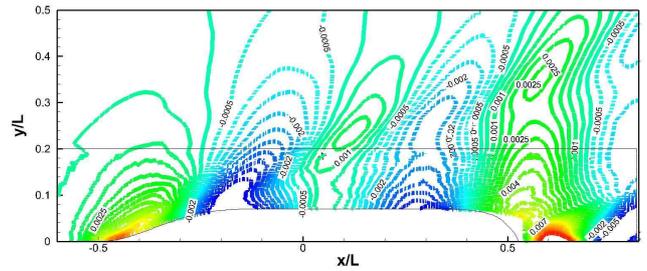
본 논문에서는 선수파 중 일정한 전진속도로 항주하는 KCS 컨테이너선에 대하여 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 모형시험 결과[9] 및 Strip 이론 결과와 비교하였다.

Table 1 Computational Domains

Domain	X	Y	Z	Radius
Outer	-1.3L~2.5L	-1.0L~0.0L	-1.0L~0.2L	-
Inner	-0.65L~0.82L	-	-	0.2L



(a) Experiment



(b) Present

Fig. 5 Comparison of wave configuration with experiment

3.1 계산 조건

계산에 사용된 계산영역의 크기는 Table 1에 정리되어 있다. 선수와 조건이므로 대칭조건을 사용하였으며, 사용된 총 격자수는 내부 영역에 $130 \times 21 \times 70$ 개, 외부영역에 $146 \times 31 \times 41$ 개이다. 선체를 포함한 내부 격자는 O-H 형태로 작성되어 있다.

Reynolds 수와 Froude 수는 Reference[9]에서 제공한 모형시험 조건과 동일하게 각각 6.52×10^6 과 0.26이며, 외부격자에서 생성되는 규칙파의 파장과 파고는 각각 8.73 m 와 0.146 m 이다. 외부 격자의 경계조건으로는 중심면에 대칭조건을 적용하였고, 입구를 제외한 나머지 경계면에는 모두 Neumann 조건을 적용하였다. 입구경계에는 선형 규칙파 이론에 따라 수치조파 기술이 적용되었다.

3.2 계산 결과

먼저, 정수 중 선체가 전진하면서 주위에 생성되는 파형을 실험과 비교하여 Fig. 5에 나타낸다. 단, $y = 0.2$ 의 선은 중첩 격자의 내부영역과 외부영역을 나누는 경계면을 나타내며, 파형의 연속성이 잘 표현되는 것을 확인할 수 있다. 이 때 선체에 작용하는 총저항은 실험이 3.56×10^3 이며, 본 시뮬레이션이 3.47×10^3 로 약 2.6%의 차이를 보였다.

다음으로, 규칙 선수와 중 일정 속도로 항주하는 시뮬레이션을 수행하여, 한 주기 동안의 선체운동을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 파고가 큰 파랑조건으로 인하여 대진폭의 비선형성이 큰 선체운동이 발생하고 있으며, 상부갑판 상부로 그린위

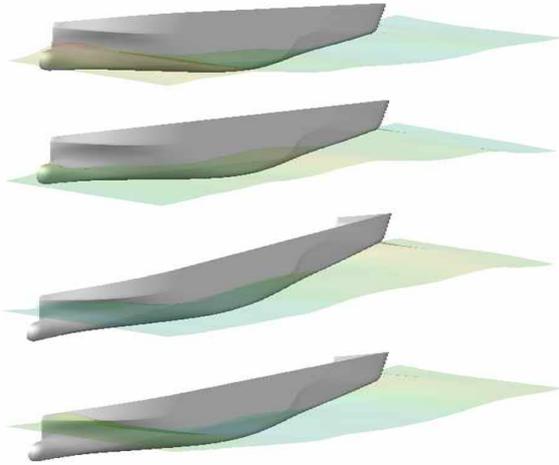


Fig. 6 Motion of KCS over a period

터가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 이로 인해 Fig. 7에서와 같이 높은 중동요와 상하동요 응답이 발생하고 있다. 모형시험 결과[9]와 비교하여 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 선형이론인 Strip 해석 결과는 실험과 본 시뮬레이션 결과에 비해 과대하게 나타나며 차이를 보인다. 결과적으로 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 시스템은 비선형성이 큰 파랑 중 선체운동을 비교적 정확하게 해석하고 있다는 것이 확인이 된다.

4. 결 론

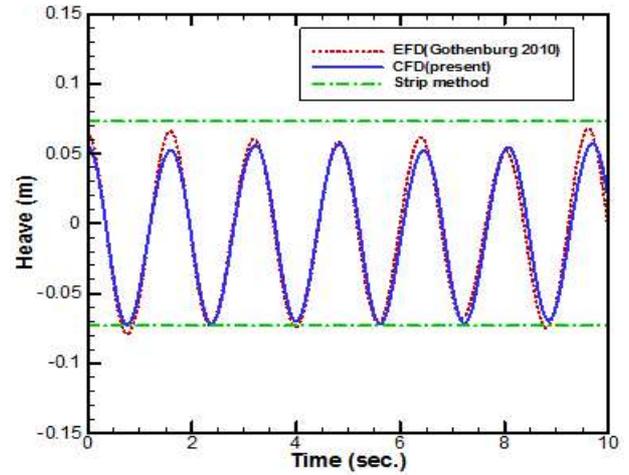
중첩격자계 기반의 파랑 중 선체의 6자유도 운동 해석기법을 사용하여 선수와 중에서 전진속도를 가지는 KCS 컨테이너 선형에 대한 2자유도 운동응답을 해석하였다. 비교적 파고 큰 파랑 조건 하에서 대진폭의 비선형이 큰 선체 운동을 잘 포착하였으며, 운동응답 역시 모형시험과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 향후 보다 다양한 모형시험과의 비교계산을 통해 본 시뮬레이션 시스템이 파랑 중 운동을 포함한 해석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

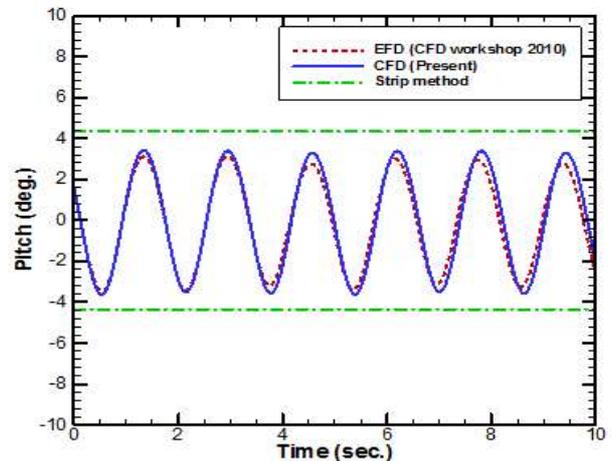
이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

Note

This paper is a revised version of the paper "An Overset-Grid



(a) Heave



(b) Pitch

Fig. 7 Time histories of heave and pitch motions of KCS

Numerical Method for 6-DOF Ship Motions in Waves" presented at the KSCFE 2012 Autumn Annual meeting, Pusan National University, Pusan, Nov. 23, 2012.

References

- [1] 1949, Ursell, F., "On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid," *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol.2, pp.218-231.
- [2] 1962, Hess, J.L. and Smith, A.M.O., "Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies," *Douglas Aircraft Company Report No. ES 40622*.
- [3] 2002, Akimoto, H. and Miyata, H., "Finite-volume simulation method to predict the performance of a sailing boat," *Journal of Marine Science Technology*, Vol.7,

- pp.31-42.
- [4] 1999, Sato, Y., Miyata, H. and Sato, T., "CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves: application to an advancing ship in regular heading waves," *Journal of Marine Science Technology*, Vol.4, pp.108-116.
- [5] 2007, Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W. and Stern, F., "Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids," *Computers and Fluids*, Vol.36, pp.1415-1433.
- [6] 2003, Orihara, H. and Miyata, H., "Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system," *Journal of Marine Science Technology*, Vol.8, pp.47-60.
- [7] 2003, Park, J.-C., Chun, H.-H. and Song, K.-J., "Numerical simulation of body motion using composite grid system," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.40, No.5, pp.36-42.
- [8] 1983, Steger, J.L., Dougherty, F.C. and Benek, J.A., "A Chimera grid scheme," *ASME FED*, Vol.5, pp.59-63.
- [9] 2010, Gothenburg CFD workshop, www.gothenburg2010.org/.
- [10] 2003, Yechout, T.R., Morris, S.L., Bossert, D.E. and Hallgren, W.F., "Introduction to aircraft flight mechanics: performance, static stability, dynamic stability, and classical feedback control," *First edition, AIAA*.
- [11] 1991, Resenfeld, M. and Kwak, D., "Time-dependent solutions of viscous incompressible flows in moving co-ordinates," *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol.13, pp.1311-1328.
- [12] 1992, Kodama, Y., "Computation of ship's resistance using an NS solver with global conservation," *Journal of Society of Naval Architecture of Japan*, Vol.172, pp.147-155.
- [13] 1978, Baldwin, B. and Lomax, H., "Thin-layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows," *AIAA Paper 78-0257*.
- [14] 1991, Germano, M., Piomeli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., "A dynamic subgrid - scale eddy viscosity model," *Physics and Fluids*, A3(7), pp.1760-1765.
- [15] 1988, Miyata, H., Katsumata, M., Lee, Y.G. and Kajitani, H., "A finite-difference simulation method for strongly interacting two-layer flow," *Journal of Society of Naval Architects of Japan*, Vol.163, pp.1-16.
- [16] 1999, Park, J.-C., Kim, M.-H. and Miyata, H., "Fully non-linear free-surface simulation by a 3D viscous numerical wave tank," *International Journal for numerical method in fluid*, Vol.29, pp.685-703.
- [17] 2005, Xiao, F., Honma, Y. and Kono, T., "A simple algebraic interface capturing scheme using hyperbolic tangent function," *Int. J. Numer. Meth. Fluid*, Vol.48, pp.1023-1040.
- [18] 2011, Park, J.-C., Hwang, S.-C. and Jeong, S.-M., "Development of a numerical simulation method for the analysis of sloshing problems based on CCUP scheme," *Korean Society Of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.3, pp.1-10.
- [19] 2007, Yokoi, K., "Efficient implementation of THINC scheme: a simple and practical smoothed VOF algorithm," *Journal of Computational Physics*, Vol.226, pp.1985-2002.