이상 유동에서의 유체-구조 연성해석을 위한 Direct Forcing/Fictitious Domain-Level Set Method

전충호* · 윤현식** · 정재환*

*부산대학교 조선해양공학과

**부산대학교 첨단조선공학연구센터

Direct forcing/fictitious domain-Level set method for two-phase flow-structure interaction

Chung Ho Jeon*, Hyun-Sik Yoon** and JaeHwan Jung*

*Dept. of Naval architect and ocean engineering, Pusan National University, Busan, Korea,

**Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Immersed Boundary Method 가상경계법, Direct Forcing/Fictitious Domain (DF/FD), Level-Set Method 레벨셋 법, Free Surface 자유수면, Two-phase Flow 이상 유동, Fluid Structure Interaction 유체-구조연성, Water Entry 입수

ABSTRACT: In the present paper, a direct forcing/fictitious domain (DF/FD) level set method is proposed to simulate the FSI (fluid-solid interaction) in two-phase flow. The main idea is to combine the direct-forcing/fictitious domain (DF/FD) method with the level set method in the Cartesian coordinates. The DF/FD method is a non-Lagrange-multiplier version of a distributed Lagrange multiplier/fictitious domain (DLM/FD) method. This method does not sacrifice the accuracy and robustness by employing a discrete δ (Dirac delta) function to transfer quantities between the Eulerian nodes and Lagrangian points explicitly as the immersed boundary method. The advantages of this approach are the simple concept, easy implementation, and utilization of the original governing equation without modification. Simulations of various water-entry problems have been conducted to validate the capability and accuracy of the present method in solving the FSI in two-phase flow. Consequently, the present results are found to be in good agreement with those of previous studies.

1. 서 론

움직이는 물체와 상호작용하는 이상 유동의 해석은 선박유체 동역학, 해양공학, 해양환경공학, 토목공학 등 여러 분야에서 과학적으로도 공학적으로도 다루어지고 있는 문제이다. 선박을 비롯한 해양구조물들이 실제 해양환경에서 운항할 시에도 Slamming, Sloshing, Green water 등의 여러 문제가 발생하며 이런 현상에 대한 정확한 예측은 해양구조물들의 설계에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

움직이는 물체와 상호작용하는 이상 유동의 수치해석기법들은 크게 Meshless method, Moving grid method와 Fixed grid method 세 가지로 분류될 수 있다. 이들 중에서 본 논문에서는 고정된 직교좌표계에서 움직이는 물체와 상호작용하는 이상 유동을 수치 해석할 수 있는 기법에 대해서 연구하였다. 고정된 좌표계에서 유체 속에서 운동하는 물체의 연구를 위하여 개발된 여러 기법들 중 가상경계법이 있다. 가상경계법은 Peskin(1972)가 제안한 Direct forcing/immersed boundary (DF/IB) method에 기반을 두고 있다. 이에 영향을 받은 Glowinski et al.(2001)에 의하여 Distributed Lagrange multiplier/fictitious domain (DLM/FD) method가 등장하였다. 또한 Höfer and Schwarzer(2001)와 Yu and Shao

(2007)에 의하여 DF/FD method가 제안되어졌다. DF/FD method는 DLM/FD method와 DF/IB method에 기반을 두고 있다. DLM/FD method의 개념은 구조의 내부 영역을 주위와 똑같은 유체로 채우고, 강제 운동을 위하여 내부의 유체 영역에 가상의 체적력으로 작용하는 Lagrange multiplier를 제안하였다. 이 때, 구조의 속도와 체적력을 구하기 위한 연산과정은 DF/IB method에서 점착조건을 만족시키기 위하여 동등한 Forcing term을 Navier-Stokes 방정식에 추가하는 과정보다 더 복잡하고 계산비용이 많이 든다. 그래서 DF/FD method에서는 DF/IB method와 동일한 방법으로 체적력을 구한다. 그러나 그 체적력은 DF/IB method에서처럼 구조의 표면에만 분포되는 것이 아니라, 내부의 전 영역에 걸쳐서 영향을 미치게 된다. 이 차이로 인하여 DF/FD method에서는 DF/IB method에서처럼 유체에 의해 작용하는 외력과 토크를 계산할 필요 없이 곧바로 구조의 속도를 갱신할 수 있다. 그래서 본 연구에서 유체 속에서 움직이는 물체의 운동을 모사하기 위하여 DF/FD method를 사용하였다.

고정된 직교좌표계에서 최근 많이 사용되는 이상 유동을 수치해석하는 방법은 Volume of fluid (VOF) method와 Level set method (LSM)가 있다. VOF method는 Volume fraction function 또는 Color function이라고 불리는 부피에 기초한 함수식을

사용한다. VOF method에서 중요한 과정은 Volume fraction 함수를 이용하여 자유수면을 재생성하는 과정이다. 자유수면이 재구성되는 과정에 의해서 VOF method는 몇가지 방법으로 구별된다. Noh and Woodward(1976)에 의한 Simple Line Interface Calculation (SLIC) method, Hirt and Nichols (1981)의 SOLA-VOF, Youngs(1982)의 Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) method 등이 있다. 상대적으로 쉽게 자유수면을 추적할 수 있고 높은 범용성을 가지고 있어 학문적으로도 산업적으로도 VOF method가 널리 쓰이고 있다. 그리고 Osher and Sethian(1988)이 고안한 Level set method에서는 level set 함수를 이용하여 자유수면을 포착한다. LSM의 기본적인 개념은 0의 값을 가질 때 자유수면을 표현하는 Level set 함수 $\phi(x,t)$ 의 정의하는 것이다 (Osher and Fedkiw, 2002). LSM은 어느 순간에서든 레벨셋 함수값이 0이 되는 위치를 이용하여서 자유수면을 포착함으로써, 다른 많은 수치적 방법에 비해서 격자 해상도에 대한 부담이 적다.

LSM에서 레벨셋 함수 값을 자유수면을 기준으로 하는, 부호를 가지는 거리 함수값으로 정의된다. 연속적인 미분이 가능한 레벨셋 함수를 이용함으로써, 자유수면의 위치, 곡률 등을 정확하고 편리하게 얻을 수 있어 자유수면의 복잡한 움직임의 구현에 많은 이점을 가진다. 운동량 방정식에서 체적력을 통한 δ 함수(Sussman et al., 1994)를 이용하거나 압력 Poisson 방정식에 포함된 Jump condition을 정확하게 해석함(Kang et al., 2000, Liu et al., 2000)으로써 자유표면에 작용하는 표면장력 또한 고려가능하다. LSM의 또 다른 장점은 2차원에서 3차원으로의 확장이 수월한 점이다. 본 연구에서도 이러한 장점으로 인하여 자유수면의 모사에 LSM을 사용하였다.

본 논문에서는 위에서 소개한 두 가지 수치해석방법을 기반으로 하여서 움직이는 물체와 상호작용하는 이상 유동을 수치 해석할 수 있는 새로운 수치해석방법을 제안하였으며, 이의 검증을 위하여 썩기 구조물과 두께가 얇은 평판의 입수 문제를 새로운 수치해석방법을 이용하여서 수치해석하였다.

2. 이론적 연구

2.1 지배 방정식

본 연구에 사용된 지배방정식은 비압축성, 점성 유체의 유동으로서 다음과 같다.

$$\frac{du_i}{dt} + \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu(\phi) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + g_i + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

여기서 u_i 는 속도, x_j 는 좌표계, p 는 압력, t 는 시간, $\rho(\phi)$ 는 밀도, $\mu(\phi)$ 는 동점성 계수, f_i 는 운동량 부가를 각각 나타낸다.

2.2 Direct-forcing fictitious domain method

본 연구에서는 Glowinski et al.(2001)이 제시한 가상영역법(Fictitious domain method)에 Direct forcing 가상경계 법과 결합하여 더욱 발전시킨 Uhlmann(2005)이 제시한 방법을 사용하였다. Uhlmann이 제시한 DF/FD 법에서 계산 영역에 작용하는 가상의 체

적력은 다음과 같이 유체와 가상경계사이의 상호작용으로 표현할 수 있다.

$$f(x) = \int_{\Omega_f} F_k \times \delta(x - X_k) dX_k \quad (3)$$

여기서 $\delta(x - X_k)$ 는 Dirac delta function이며, X_k 는 가상경계 위의 라그랑지안(Lagrangian) 포인트, x 는 계산영역인 오일러리안 그리드이다. Fig. 1처럼 오일러리안 그리드는 직교좌표계로 생성되며 그 위에 라그랑지안 포인트가 뿌려져서 물체로 생각된다. F_k 는 라그랑지안 포인트에 작용하는 가상적인 힘이다. 가상경계 위의 라그랑지안 포인트 X_k 에서 점착조건을 만족하기 위해 X_k 에서의 속도 U_k 와 Desired velocity U_L 을 같게 하기 위해 가상의 힘, $F_k(X_k)$ 가 라그랑지안 포인트에 부여된다. $F_k(X_k)$ 는 다음과 같이 구해진다.

먼저 식 (1)로부터

$$f_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu(\phi) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - g_i \quad (4)$$

$$f_i = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + rhs_i \quad (5)$$

Fig. 1 Definition of the eulerian grid χ and the Lagrangian point X_k

가 얻어지며 여기서

$$rhs_i = -\left(\frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu(\phi) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - g_i \right) \quad (6)$$

이 되며, 다음의 운동량 방정식을 만족하는 가상적인 속도, $\hat{u}$ 를 식 (5)에 대입하면 식 (8)을 얻게 된다.

$$\frac{\hat{u} - u_i^n}{\Delta t} - rhs_i = 0 \quad (7)$$

$$f_i = \frac{u_i^{n+1} - \hat{u}}{\Delta t} \quad (8)$$

식(4)에서 (8)의 과정을 라그랑지안 포인트에서도 똑같이 적용되며, 다음과 같은 식을 이용하여서 라그랑지안 포인트에 부과되는 F_k 를 구할 수 있다.

$$F_k = \frac{U_k^{n+1} - \hat{U}_k}{\Delta t} = \frac{U_L - \hat{U}_k}{\Delta t} \quad (9)$$

식 (9)에서 부가된 체적력의 영향 아래 X_k 에서의 $n+1$ 시간에서의 속도 U_k^{n+1} 은 구조의 운동방정식에 의하여 구해지는 Desired velocity U_L 로 변환할 수 있다. 오일러리안 그리드와 라그랑지안 포인트 사이의 연계를 위해 Dirac delta function이 사용되며, 가상경계 위의 라그랑지안 포인트 X_k 에서의 가상속도는 그 주위의 오일러리안 그리드 x 로부터 얻어진다.

$$\hat{U}_k = \sum_{x \in \Omega} \hat{u} \cdot \delta_h(X_k - x) \cdot h^2 \quad (10)$$

식 (10)에서 얻어진 $\hat{U}_k$ 를 식 (9)에 대입하여 F_k 를 얻을 수 있으며, 오일러리안 그리드에 작용하는 f_i 를 얻기 위하여 다음과 같은 식을 사용한다.

$$f_i(x) = \int_{\Omega} F_k(X_k) \delta_h(x - X_k) dX_k \quad (11)$$

본 연구에서 사용되어진 Discrete delta function은 다음과 같다 (Roma et al., 1999).

$$\delta_h(x_i - x_{i_0}) = \frac{1}{h} \phi\left(\frac{x_i - x_{i_0}}{h}\right) \quad (12)$$

$$\phi(r) = \begin{cases} \frac{1}{6}(5-3|r| - \sqrt{3(1-|r|)^2+1}), & 0.5 \leq |r| \leq 1.5 \\ \frac{1}{3}(1 + \sqrt{3|r|^2+1}) & , |r| \leq 0.5 \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (13)$$

라그랑지안 포인트로 이루어진 구조물은 강체로 가정되며, 운동방정식은 뉴턴의 운동법칙에 기반을 두고 있다. 본 연구에서는 Yu and Shao(2007)가 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$V_p(\rho_p - \rho_f) \frac{du_c}{dt} = -\rho_f \sum_{\Omega} F_k \Delta A_i + V_p(\rho_p - \rho_f)g \quad (14)$$

$$I_p \frac{dw_c}{dt} = -\frac{\rho_p \rho_f}{\rho_p - \rho_f} \sum_{\Omega} (X_k - x_c) F_k \Delta A_i \quad (15)$$

위 식에서 x_c 는 구조물의 무게중심위치이며, u_c 와 w_c 는 구조물의 수평방향과 회전운동 속도이다. V_p , p_p , I_p 는 각각 구조물의 부피, 밀도, 관성모멘트를 나타낸다. ΔA_i 은 구조물을 이루는 각 라그랑지안 포인트의 부피이며, g 는 구조물에 작용하는 중력가속도이다.

2.3 Level set method

자유수면을 가진 이상유체의 해석을 위하여 레벨 셋 방법을 적용하였다. 레벨 셋 방법이란 거리함수인 $\phi(x,t)$ 를 적용하여, 이상유체의 경계면을 추적하는 방법이다.

$$\phi(x,t) = \begin{cases} < 0 & \text{liquid} \\ = 0 & \text{free-surface} \\ > 0 & \text{gas} \end{cases} \quad (16)$$

레벨 셋 방법에서는 경계면 사이에서 유체의 물성치에 해당하는 밀도와 점성계수 값이 급격히 변화하여, 수치적 불안정성이 발생한다. 이 불안정성을 막기 위하여 임의의 상경계면 두께 ϵ 를 지정하여 Heaviside 함수 $H(\phi)$ 를 이용하여 경계면 근처의

물성치 값을 부드럽게 이어준다.

$$\begin{aligned} \rho(\phi) &= \rho_l + (\rho_g - \rho_l)H(\phi) \\ \mu(\phi) &= \mu_l + (\mu_g - \mu_l)H(\phi) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 ρ_l 와 μ_l 은 액체의 밀도와 점성계수이며, ρ_g 와 μ_g 는 기체의 밀도와 점성계수이며, 위치 x 에 있는 유체의 물성치는 경계면과의 거리 $\phi(x,t)$ 와 Heaviside 함수 $H(\phi)$ 에 의하여 결정된다. 상경계면, 즉 자유수면 $\phi(x,t)$ 는 다음의 운동학적 경계조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (18)$$

위 식 (18)의 계산으로 얻어지는 해는 부호를 갖는 거리함수이나, 상경계면으로부터 먼 곳에서 계산된 거리 값의 정확도가 다소 낮아지게 되며, 상경계면 근처에서 급격한 거리함수값의 변화가 일어나게 된다. 이를 해결하기 위하여 재초기화 과정이 필요하다. 본 연구에서는 Sussman et al.(1997)에 의해 제안된 재초기화 방법을 사용하였다.

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + s(d_0)(|\nabla d| - 1) = \lambda \delta(d) |\nabla d_0| \quad (19)$$

$$d_0(x,t) = \phi(x,t) \quad (20)$$

$$s(d_0) = \frac{d_0}{\sqrt{d_0^2 + (|\nabla d_0| \epsilon)^2}} \quad (21)$$

여기서 τ 는 가상시간, d_0 는 초기의 ϕ 값, λ 는 질량손실을 보정해주는 계수값이다. 식(18)의 해 d 가 새로운 ϕ 값이 되어 계산의 정확도를 높여준다.

2.4 수치해석 방법 및 경계조건

기초방정식은 유한체적법(Finite volume method)을 기반으로 하여 비엇갈림 격자계(Non-staggered grid)를 사용하였다. 속도와 압력은 동일 지점인 격자의 셀 중심(Cell center)에서 계산되었다. 대류항과 외력항 등은 2nd order Adams-Bashforth Scheme을, 확산항 등은 Crank-Nicholson Scheme을 사용하여 이산화하였다. 레벨셋 함수, $\phi(x,t)$ 의 이산화에는 공간적으로는 3차 정확도의 ENO (Essentially non-oscillatory)법을, 시간에 대해서는 3차 정확도의 TVD Runge-kutta 법을 적용하였다(Sussman et al., 1997; Yue et al., 2003; Shu and Osher, 1989).

시간 진행은 Kim and Moin(1985)이 제안한 Fractional-step method를 이용하였다.

3. 수치적 해석 결과

3.1 자유낙하하는 췌기구조물

본 연구에서 제시한 수치해석기법의 정확도를 검증하기 위하여 자유낙하하여 자유수면을 통과하는 췌기구조물의 낙하문제에 수치해석하여 그 결과값들을 실험 결과값들과 비교하였다.

췌기형 구조물의 낙하 시험은 Peterson et al.(1997)에 의해 실험적으로, Xu et al.(1999)에 의해서는 이론적으로 연구되어졌다. 본 연구에서는 Peterson et al.(1997)의 실험조건과 동일한 조건에서 수치실험을 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 췌기구조물의 시간에 따른 속도와 가속도의 변화를 Peterson et al.(1997)의 실험

Fig. 2 Schematics of freely falling wedge(unit : m)

Fig. 3 Time history of vertical acceleration, velocity, position for the symmetric drop test simulation (lines: present calculation, symbols : Peterson et al.(1997))

결과와 비교해보았다.

계산에 사용된 구조물의 형상은 Peterson et al.(1997)과 Azcueta (2001)의 조건을 동일하다. 본 연구에서 고려되어진 췌기 구조물의 형상과 계산영역은 Fig. 2에 나타나 있으며, Peterson et al.(1997)이 사용한 0.6m x 2.44m의 3차원 형상의 췌기 구조물을 2차원 췌기 형상으로 단순화시켰다. 췌기 구조물의 경사각은 20°이며, 췌기 끝단과 자유수면과의 거리는 0.6m이다. 계산 영역은 각각 췌기 양측 면에서 2m, 끝단에서 아랫방향으로 1.5m, 윗 방향으로 1m씩 확장하여, 591×321개의 0.0078m 간격의 균일 격자로 만들어졌다.

Fig. 2에 나타나 있는 췌기 구조물의 초기 위치에서 낙하가 시작되었으며, 시간에 따른 구조물의 가속도, 낙하 속도, 낙하 위치를 Peterson et al.(1997)의 실험 결과와 비교하여서 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 제안한 수치해석방법으로 얻어진 결과가 실험값과 잘 일치함을 볼 수 있다. 낙하가 시작되면서 구조물에 음의 방향으로 일정한 크기의 가속도, a 가 작용하며, 입수되는 짧은 순간에 양의 방향으로 큰 가속도가 작용한다.

낙하하는 구조물 주위의 속도 벡터장을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4 Deformation of free surface and velocity vectors around a falling wedge

본 논문에서는 수치해석방법의 검증에 주안점을 두어서, 물리적 현상의 규명에 대해서는 차후 다른 논문에서 언급하도록 하겠다. 본 연구에서 제안한 수치해석방법은 오일러리안 기법에 기반을 두어 고정된 정규 격자로 구성된 계산 영역에서 수치해석이 수행되어서 속도를 비롯한 여러 물리적인 수치들을 일정하게 얻을 수 있다. 이로 인해 Fig. 4에서는 구조물이 낙하하면서 발생하는 와류의 움직임과 구조물이 입수할 때의 자유수면의 변화와 그에 따른 와류의 생성을 상세하게 볼 수 있다.

3.2 입사각을 가지는 평판의 충격하중

입사각을 가진 평판이 자유 수면에 낙하할 때, 평판에 작용하는 충격 하중을 본 연구에서 제안한 수치해석방법을 이용하여 추정하였다.

계산 영역은 Fig. 5에 나타나있다. 자유 수면으로부터 0.187m 떨어져 있는 평판의 형상과 크기는 Chung et al.(2007)의 실험 조건과 같다. 평판의 폭은 0.56m이며 두께는 0.01m이다. 초기에 주어지는 입사각은 0°에서 8°와 10°의 열 가지 경우가 주어졌다. 평판은 계산이 수행되는 동안 2.2m/s의 일정한 속도로 낙하하며, 압력은 평판의 바닥 중앙에서 측정되어진다. 전체 계산 영역의 크기는 1.8667m x 2.8m 이며, Lee et al.(2010)의 계산 조건을 참고하였다. 0.005m의 간격을 가지는 375 x 561개의 균일격자가 사용되었다.

Fig. 6은 각 입사각에 따른 최대 압력계수 값들을 비교한 그림이다. 본 연구에서 구한 압력계수 값과 Lee et al.(2010)이 입자법을 이용하여 수치해석하여 구한 값, Chung et al.(2007)이 실험하여 구한 결과값, 그리고 Chuang(1967)이 경험식을 이용하여 구한 값들을 서로 비교하였다.

입사각이 2° 이상인 경우에는 Chung et al.(2007)의 실험값에서 나타나는 경향을 따라가고 있으며, 실험값에서의 반복오차를 고려하였을 때, 정량적으로도 만족하고 있다. 반면, 입사각이 0°와 1°인 경우에는 실험값보다 훨씬 큰 값을 나타낸다.

이 두 가지 경우에는 평판이 자유수면에 닿기 전에 바닥과 자유수면 사이에서 발생하는 에어 쿠션 효과가 발생하게 된다. 이 현상은 Chuang(1967)과 Chung et al.(2007)의 연구에서도 관찰되어진다. 그러나 본 연구에서는 유체를 비압축성으로 가정하여 에어 쿠션의 생성과 그 복잡한 움직임을 정확하게 추정할 수 없

Fig. 5 Schematics of flat plate with incident angle(unit : m)

Fig. 6 Maximum pressure coefficients for various incident angles

다. 그리하여 0°와 1°의 경우 평판 바닥과 자유수면 사이에서 발생하는 기포가 비현실적인 움직임을 보이게 되어 실험결과와 두 배에 달하는 큰 압력값을 얻게 되었다. 또한 입사각이 1°인 경우일 때 왼쪽 끝단이 압력이 계측되는 바닥의 중앙부보다 먼저 자유수면에 입수하게 되고 이로 인하여 자유수면의 변화가 일어나며 이로 인하여 입사각이 0°일 때보다 1°일 때의 압력값이 더 크게 나왔다. 비압축성 유동으로 가정하여 수치해석하여서 오차가 발생하는 점은 Lee et al.(2010)의 경우와 동일하다.

Fig. 7은 평판의 중심에 최대 압력이 작용하는 순간의 자유수면의 변화와 평판 주위의 속도 성분을 표현하고 있다. 0°와 1°의 경우 평판과 자유수면 사이의 간격이 좁아져서 양 측면으로 수평방향의 제트류가 발생하고 이 제트류에 의해서 강한 와류와 함께 전단응력이 자유수면을 따라서 발생한다. 이보다 더 큰 입사각을 가지는 경우에는 평판의 왼쪽 끝단은 제트류의 발생 없이 그대로 물속으로 들어가며 오른쪽 끝단에서만 평판과 수면사이의 공간이 좁아짐에 따라 오른쪽 방향으로 강하게 빠져나가는 제트류가 발생한다. 또한 평판의 중앙 부분이 물과 충돌할 때, 이미 한 쪽 끝단이 입수한 상태이고, 평판의 입사각 때문에 유체 입자가 수직방향 뿐 아니라 수평방향의 운동을 가져서 0°일 때보다 적은 양의 충격하중이 계측된다.

Fig. 7 Deformation of free surface and velocity vectors around the plate

4. 결 론

자유수면에 입수하는 물체의 운동을 수치해석하는 데에는 움직이는 물체의 거동과 비선형 자유수면의 추적이라는 두 가지 어려움이 존재한다. 그 문제들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 DF/FD 법과 레벨 셋 법을 결합시킨 수치해석방법을 이용하여 자유수면에 입수하는 쉘기구조물과 평판의 시뮬레이션을 수행하였다.

초기 위치에서 중력에 의해 자유낙하하여 자유수면에 입수하는 쉘기구조물을 수치해석하여서 구한 구조물의 가속도와 속도, 낙하위치를 실험결과와 비교하였다. 그 결과 실험결과와 본 연구에서 얻어진 수치해석값들이 잘 일치함을 확인하였으며, 구조물의 운동으로 인하여 생성되는 유동 구조를 관찰하였다.

또한 입사각을 변화시키면서 평판을 자유수면에 낙하시키는

수치실험을 수행하였다. 각각의 입사각에서 얻어진 압력계수들을 선행연구 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

평판의 입사각이 2° 보다 큰 경우에는 실험값과 비슷한 경향과 크기를 보였으며, 0° 와 1° 의 경우에는 비압축성 유체를 가정하여 평판이 입수할 때 발생하는 기포를 고려하지 못하여 실험값보다 큰 압력값을 얻었다. 본 연구에서 제안한 수치해석방법은 오일러리안 방법에 기반을 두어 고정된 정규 격자로 구성된 계산영역에서 유체의 속도, 밀도 등의 물리값들을 일정하게 얻을 수 있고, 이로 인하여 평판이 자유수면에 입수할 때, 입사각에 따라 달라지는 평판 주위의 비대칭적인 와도 구조와 평판에 부딪치는 유체가 가지는 속도 성분을 정확하게 관찰할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0065835). 또한 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0025618).

참 고 문 헌

- Azcueta, R.(2001). Computation of Turbulent Free-surface Flows around Ships and Floating bodies, Ph D. Thesis, Technical University Hamburg-Harburg.
- Chuang, S.L.(1967). "Experiments on Slamming of Wedge-shaped Bodies", Journal of Ship Research, Vol 11-3.
- Chung, J.Y., Chung, J.O., Kang, H.D., Kwon, S.H.(2007). "A Novel Experimental Technique in Slamming", In: Proceedings of the 22nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Croatia, pp 41-44.
- Glowinski, R., Pana, T. W., Heslab, T. I., Josephb, D. D. and Périaux, J.(2001). "A Fictitious Domain approach to the Direct Numerical Simulation of Incompressible Viscous Flow past Moving Rigid Bodies: Application to Particulate Flow", J. Comp. Phys., Vol 169, pp 363-426.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D.(1981). "Volume of Fluid (VOF) Methods for the Dynamics of Free Boundaries.", Journal of Computational Physics, Vol 39, pp 201-225.
- Höfler, K. and Schwarzer, S. (2001). "Navier-Stokes Simulation with Constraint Forces: Finite-Difference Method for Particle-laden Flows and Complex Geometries.", Phys. Rev. E61-6, pp 7146-7160.
- Kim, J. and Moin, P. (1985). "Application of a Fractional Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations", J. Comp. Physics Vol 59, pp 308-323.
- Kang, M., Fedkiw, R.P. and Liu X.D.(2000). "A Boundary Condition Capturing Method for Multiphase Uncompressible Flow.", Journal of Scientific Computing, Vol 15, pp 323-360.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H., Jung, S.J., Ryu, M.C. and Kim, Y.S. (2010). "Numerical Simulation of Impact Loads using a Particle Method", Ocean Engineering, Vol 37, pp 164-173.
- Liu, X.D., Fedkiw, R.P. and Kang M. (2000). "A Boundary Condition Capturing Method for Poisson's Equation on Irregular Domains.", J. Comp. Phys., Vol 160, pp 151-178.
- Noh, W.F. and Woodward, P. (1976). "SLIC (Simple Line Interface Calculation).", In Lecture Notes in Physics, Vol 59, Springer-Verlag: New York, pp 330-340.
- Osher, S. and Sethian, J.A. (1988). "Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed : Algorithms based on Hamilton-Jacobi Formulations.", J. Comp. Phys., Vol 79, pp 12-49.
- Osher, S. and Fedkiw, R.P. (2002). Level Set Method and Dynamic Implicit Surfaces, Springer: Berlin.
- Peskin, C.S. (1972). "Flow Patterns around Heart Valves: a Numerical Method.", J. Comput. Phys. Vol 10, pp 252-271.
- Peterson, R., Wyman, D., and Frank C. (1997). "Drop Tests to Support Water-Impact and Planing Boat Dynamics Theory", CSS Technical Report, Coastal Systems Station, Panama City, USA. TR-9.
- Roma, A., Peskin, C. and Berger, M. (1999). "An Adaptive Version of the immersed Boundary Method", J. Comput. Phys., Vol 153, pp 509-534.
- Shu, C. and Osher, S. (1989). "Efficient Implementation of essentially Non Oscillatory Shock Capturing Schemes II", J. Comput. Phys., Vol 83, pp 32-78.
- Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S. (1994). "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-phase Flow.", J. Comp. Phys., Vol 114, pp 146-159.
- Sussman, M., Fatemi, E., Smereka, P. and Osher, S. (1997). "An Improved Level Set Method for Incompressible Two-Phase Flows", Computers and Fluids, Vol 27, pp 663-680.
- Uhlmann, M. (2005). "An immersed Boundary Method with Direct Forcing for the Simulation of Particulate Flows", J. Comp. Phys., Vol 209, pp 448-476.
- Youngs, D.L. (1982). "Time-dependent Multi-material ow with Large uid Distortion.", In Numerical Methods for Fluid Dynamics, Morton K.W., Baines M.J.(eds), Academic: New York, pp 273-285.
- Yu, Z. and Shao, X. (2007). "A Direct-forcing Fictitious Domain Method for Particulate Flows.", J. Comput. Phys Vol 227, pp 292-314.
- Yue, W. Lin, C.L. and Patel, V.C. (2003). "Numerical Simulation of Unsteady Multidimensional Free Surface Motions by Level Set Method", Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol 42, pp 853-884.
- Xu, L., Troesch, A.W. and Peterson R. (1999). "Asymmetric Hydrodynamic Impact and Dynamic Response of Vessels.", J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol 121, pp 83-89..

2010년 12월 31일 원고 접수

2011년 6월 27일 심사 완료

2011년 8월 16일 게재 확정