

CCUP 기법을 이용한 2 차원 슬로싱 문제의 수치해석

양경규*, 김용환†*

서울대학교 공과대학 조선해양공학과*

Numerical Analysis of Violent Sloshing Problems by CCUP Method

Kyungkyu Yang* and Yonghwan Kim†*

Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*

Abstract

In the present paper, a numerical method based on the constraint interpolation profile (CIP) method is applied for simulating two-dimensional violent sloshing problems. The free surface boundary value problem is considered as a multiphase problem which includes water and air. A stationary Cartesian grid system is adopted, and an interface capturing method is used to trace the shape of free surface profile. The CIP combined unified procedure (CCUP) scheme is applied for flow solver, and the tangent of hyperbola for interface capturing (THINC) scheme is used for interface capturing. Numerical simulations have been carried out for partially-filled 2D tanks under forced sway and roll motions at various filling depths and frequencies. The computational results are compared with experiments and/or the other numerical results to validate the present numerical method.

※Keywords: CIP, CCUP, THINC, Sloshing(슬로싱), Free surface flow(자유표면 유동), Multi-phase flow(다상유동)

1. 서론

슬로싱 유동은 외부 기진력에 의하여 움직이는 탱크 내부에 부분적으로 적재된 유체가 일으키는 유동 현상이다. 1950 년과 1960 년대 우주 로켓과 관련하여 연료탱크 내부의 슬로싱 유동에 의한 궤도 변화를 예측하기 위한 연구들이 진행 되었고, 1970 년과 1980 년대에 LNG 운반선의 건조가 증가하면서 선박 내의 슬로싱 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 최근 LNG 에 대한 수요 증가로 LNG 운반선이 대형화 되고 있고 LNG Re-gasification Vessel(RV), LNG-FPSO, FSRU 와 같은 새로운 개념의 선박 및 해양구조물들의 개발이 이루어지고 있어 슬로싱에 대한 해석이 그 어느 때보다 중요한 시점이다. 선박의 슬로싱에 대한 연구들은 적지 않은데, Faltinsen(1978)은 2 차원 슬로싱 문제에 대하여 경계요소법을 이용하여 해석을 시도하였고 Wu and Eatock Taylor(1998)는 유한요소법을 이용하여 슬로싱 문제에 접근하였다. Kim(2001)은 유한차분법을 이용하여 3 차원 탱크에 대한 충격하중을 계산하였고, Kim et al.(2007)은 SPH 방법을 사용하여 비선형 현상이 강하게 나타나는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 그외에도 선박의 운동과 연성하여 해석한 연구결과 (Kim 2002, Cho et al. 2006, Kim 2007)도 발표되고 있다.

앞서 소개한 바와 같이 슬로싱 문제에 대한 해석을 위하여 지금까지 많은 수치해석 기법들이 적용되어 왔으나, 자유표면의 심한 비선형적 거동으로 인해 정확한 해석에 어려움을 겪고 있다. 심한 비선형성을 갖는 자유표면파 문제에 대해서는 경계면 포착법(interface capturing method)이 주로 사용되고 있는데, 이와 관련하여 VOF(volume of fluid)법(Park et al. 2005, Kim et al. 2007)과 Level Set 방법(Park and Chun 1999, Yoon et al. 2008)이 근래 들어 많이 사용되어 왔다. 최근에는 두 기법을 결합한 하이브리드(hybrid) 기법들도 개발되어 조선 유체 분야에 적용되고 있다(Park et al. 2009).

그 동안 자유표면 문제에 대한 격자 기반의 수

CCUP 기법을 이용한 2 차원 슬로싱 문제의 수치해석

치기법에서는 수치적 확산(numerical diffusion)이 심각한 문제로 두각 되어왔다. 이러한 수치적 확산을 줄이기 위하여 Takewaki and Yabe(1987)에 의하여 CIP(constrained interpolation profile) 기법이 개발 되었고, 이를 기반으로 하여 자유표면 문제를 물과 공기의 다상 문제(multiphase problem)로 해석하는 CCUP(CIP-combined and unified procedure)기법이 개발되었다(Yabe 1991). 이들 기법을 이용하여 Hu and Kashiwagi(2004), Kisev et al. (2006)은 여러 자유표면파 문제에 대한 해석결과를 발표한 바 있다. 최근에는 Xiao et al. (2005)에 의하여 tangent hyperbolic 함수를 이용한 THINC (tangent of hyperbola for interface capturing) 기법이 개발되었는데 이 기법은 문제의 정식화가 간단하고 프로그래밍이 용이한 장점이 있다. 더불어 수치적 확산 또한 상당히 감소시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다.

본 논문에서는 2 차원 사각탱크에 대하여 좌우동요(sway)와 횡동요(roll) 운동 하에서 발생하는 슬로싱 현상에 대한 해석을 CCUP 기법을 이용하여 수행하였다. 자유표면을 찾기 위하여 THINC 기법을 사용하였으며, 개발된 프로그램의 검증을 위하여 계산 결과들을 실험 및 다른 수치 기법의 결과들과 비교하였다. 이러한 연구를 통해 본 연구에서 적용한 기법의 활용 가능성과 효용성에 대하여 알아본다.

2. CCUP Scheme

CIP 의 기본적인 아이디어는 어떤 물리량 f 에 대하여 물리량 자체의 값 및 공간에 대한 미분치 ($g = \partial f / \partial x$) 를 같이 고려하여 한 격자에 대한 내삽(interpolation) 함수를 3 차의 다항식으로 구성하는 것이다. 일정한 시간 간격 동안 물리량과 공간에 대한 미분치를 다음과 같은 semi-Lagrangian 과정을 통해 갱신한다.

$$f^{n+1}(\mathbf{x}) = f^n(\mathbf{x} - \mathbf{u}\Delta t); g^{n+1}(\mathbf{x}) = g^n(\mathbf{x} - \mathbf{u}\Delta t) \quad (1)$$

CCUP 는 CIP 의 개념을 적용하여 일반적인 유

동 문제를 해석하기 위하여 개발된 하나의 수치기법이다(Yabe 1991). 초기에 개발된 CCUP 기법은 압축성 유동과 비압축성 유동을 동일한 방정식을 사용하여 동시에 해석하는 방법이었으나, 본 논문에서는 압축성에 의한 영향은 논의 대상에서 배제하고 비압축성을 가정한 CCUP 기법(Hu and Kashiwagi 2004)을 사용하여 수치계산을 수행하였다.

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

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (3)$$

여기에서 (3)식의 우변의 마지막 항은 중력과 같은 외력항을 의미한다. 식 (3)식을 공간좌표에 대하여 미분하면 다음 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial(\partial_\xi u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\partial_\xi u_i)}{\partial x_j} = -(\partial_\xi u_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial S}{\partial \xi} \quad (4)$$

여기서 $\partial_\xi u_i = \partial u_i / \partial \xi$, ($\xi = x_1, x_2$) 이고 S 는 점성항과 외력항을 의미한다. 위의 방정식들을 주어진 경계조건 하에서 수치적인 해를 구하기 위하여 fractional step method 를 이용하여 3 단계로 나누어 계산한다.

- Advection step:

이 단계에서는 대류항에 대한 계산을 한다. 식 (3)과 (4)의 왼쪽 항만을 고려하여 다음과 같은 방정식을 풀게 된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\partial_\xi u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\partial_\xi u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

수치적 확산을 줄이기 위해 이 단계에서 CIP 기법을 적용하게 된다.

$$u_i^*(\mathbf{x}) = f_i^n(\mathbf{x} - \mathbf{u}^n \Delta t) \quad (7)$$

$$(\partial_\xi u_i)^*(\mathbf{x}) = \frac{\partial f_i^n(\mathbf{x} - \mathbf{u}^n \Delta t)}{\partial \xi} \quad (8)$$

여기서 위첨자 *는 중간 단계에서의 계산 값을 의미한다.

- Non-advection step (i):

이 단계에서는 식 (3)와 (4)의 압력항을 제외한 오른쪽 항들을 고려하여 계산을 수행한다.

$$\frac{u_i^{**} - u_i^*}{\Delta t} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j \partial x_j} \right) + f_i \quad (9)$$

$$\frac{(\partial_\xi u_i)^{**} - (\partial_\xi u_i)^*}{\Delta t} = -(\partial_\xi u_j)^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial S^*}{\partial \xi} \quad (10)$$

여기서 위첨자 ** 역시 중간 단계에서의 계산 값을 의미하고 식 (9)과 (10)의 오른쪽 항들은 중심차분(central difference)을 사용하여 차분하였다.

- Non-advection step (ii):

이 단계에서는 속도와 압력을 연성(coupling)하여 다루게 된다.

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^{**}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (11)$$

식 (11)에 발산연산자(divergence operator)를 취하고 연속방정식을 적용하면 다음과 같은 압력 포아송(pressure Poisson) 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^{**}}{\partial x_i} \quad (12)$$

본 논문에서는 Bi-CGSTAB 방법을 이용하여 방

정식 (12)를 풀어 다음 시간 단계에서의 압력장을 계산하였다. 이 압력장을 (11)식에 적용하여 다음 시간 단계의 속도장을 구하게 된다.

3. THINC method

CCUP 기법에서는 전체 영역을 물과 공기의 다상 유동 (multiphase flow)으로 생각하고 각 셀에서의 밀도 함수 값(ϕ_m ; $m=1$ water, $m=2$ air)을 식 (13)에 따라 변화하도록 하여 자유표면의 위치를 찾게 된다.

$$\frac{\partial \phi_m}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi_m}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

이 때 한 셀에 대하여 $\sum_m \phi_m = 1$ 을 만족 하도록 하며, 각 셀에서의 밀도와 점성계수 값은 식 (14)를 이용하여 계산한다.

$$\rho_{cell} = \sum_m \rho_m \phi_m \text{ and } \mu_{cell} = \sum_m \mu_m \phi_m \quad (14)$$

이론적으로는 $\phi_i = 0.5$ 인 곳이 자유표면이 위치한 곳으로 그 두께가 없지만 수치적인 오차로 인하여 수치계산 결과에서는 일정한 두께를 갖게 된다.

THINC 기법은 불연속점이 존재하는 물리량의 경계를 효율적으로 찾기 위하여 Xiao et al.(2005)에 의하여 개발되었다. 이에 대한 설명을 위하여 다음과 같은 밀도함수 ϕ 에 대한 1 차원 대류 방정식을 생각해 보자.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u\phi)}{\partial x} = \phi \frac{\partial u}{\partial x} \quad (15)$$

식 (15)을 보면 CIP 와는 다르게 THINC 기법에서는 보존형 방정식을 이용하여 계산하는 것을 알 수 있다.

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 속도가 양인 경우에 대하여 생각해 보자. 식 (15)를 유한체적법 (finite volume method)을 이용하여 이산화 하고

CCUP 기법을 이용한 2 차원 슬로싱 문제의 수치해석

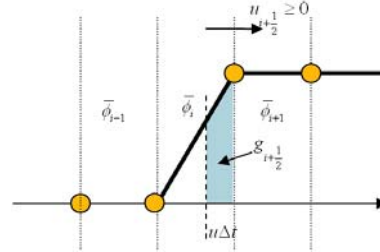


Fig. 1 Concept of THINC method for $u_{i+1/2} \geq 0$

각 셀에서 시간과 공간에 대하여 적분하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\bar{\phi}_i^{n+1} = \bar{\phi}_i^n + \frac{(g_{i-1/2} - g_{i+1/2})}{\Delta x_i} + \bar{\phi}_i^n \frac{(u_{i+1/2} - u_{i-1/2})}{\Delta x_i} \Delta t \quad (16)$$

여기서 $\bar{\phi}$ 는 각 셀에서의 평균밀도함수를 의미하며 셀의 중심에서 정의된 값이다. 셀에서의 함수를 식 (17)과 같은 tangent hyperbolic 함수로 가정하면 식 (18)과 같은 관계를 얻는다.

$$F_i(x) = \frac{\alpha}{2} \left\{ 1 + \gamma \tanh \left[\beta \left(\frac{x - x_{i-1/2}}{\Delta x_i} - \delta \right) \right] \right\} \quad (17)$$

$$\bar{\phi}_i^n = \frac{1}{\Delta x_i} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} F_i(x) dx \quad (18)$$

각 cell 의 경계에서 들어오고 나가는 numerical flux 는 (19)식을 이용하여 계산된다.

$$g_{i+1/2} = \frac{1}{\Delta x_i} \int_{x_{i+1/2} - \Delta_{up}}^{x_{i+1/2}} F_i(x) dx \quad (19)$$

여기서 $\Delta_{up} = |u_{i+1/2} \Delta t|$ 이다. 식 (17)에 정의된 4 개의 상수 ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)에 대한 계산 과정은 Xiao et al.(2005)의 논문에서 찾아 볼 수 있다.

ϕ 값의 범위를 제한한 limited CIP 와 THINC 의 정확도에 대한 비교를 위하여 1 차원 사각형 파동

에 대한 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 격자와 시간 간격은 0.01 이며 CFL 값으로 0.2 를 사용하였다. 1000 번째 시간단계 후에 구해지는 ϕ 값을 Fig. 2에 나타내고 있다. THINC 기법을 사용한 경우 수치적 확산 없이 사각형의 파동을 거의 정확하게 계산 하는 것을 알 수 있으며, 더불어 ϕ 값에 대한 수정 없이도 결과 값이 0~1 사이에서 계산됨을 알 수 있다.

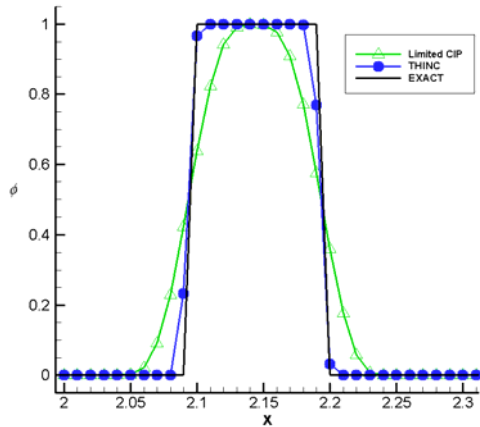


Fig. 2 1D transport of a square wave (THINC)

4. 수치계산 결과

4.1 Sway Excitation

슬로싱 계산을 위해 적용된 모델은 Fig. 3 과 같은 800mm×500mm 의 내부 부재가 없는 매끈한 사각형 탱크이며, 이 모델에 대한 실험은 1991 년 Hitachi 조선 연구소에서 대우조선해양(DSME)의 지원 및 협력 하에 이루어진 바 있다. 본 논문에서는 탱크 높이의 50% 만큼 물을 채운 경우에 대하여 중점적으로 계산결과를 나타내었다. 본 계산에서는 격자의존성(grid dependency) 테스트를 통해 128×80 의 셀 개수를 선택하였으며 시간간격은 CFL 조건에 따라 변화 하도록 하였다.

탱크는 길이 방향으로 다음과 같은 운동을 하도록 되어있다.

$$X = \xi \sin \omega t \quad (20)$$

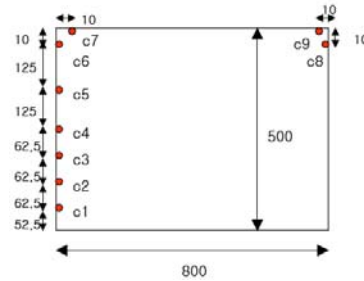


Fig. 3 DSME model and the positions of the pressure sensors (unit: mm)

여기서 ω 는 기진 진동수를 의미하며 식 (21)과 같은 고유진동수로 얻어진다.

$$\omega_n^2 = \frac{g\pi}{L} \cdot \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad (21)$$

여기서 g 는 중력가속도를 의미하고 h 는 수심, L 은 탱크의 길이를 의미한다.

유체영역에 대한 시간에 따른 밀도 함수값의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 본 논문에서는 Kim (2001)에 의해 소개된 방법을 사용하여 일정시간 간격으로 계산 과정에서 손실된 유체를 자유표면 근처에 재분포 시켰다. 이 때 보정되는 유체의 양이 매우 작기 때문에 전체적인 유체의 거동에는 영향을 미치지 않는다.

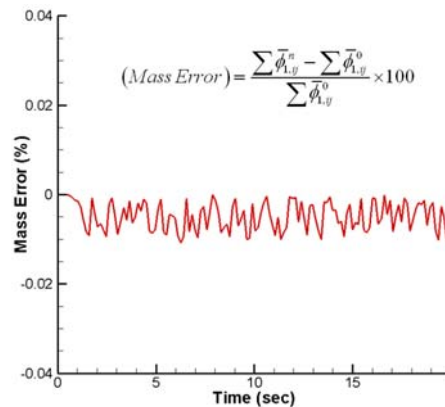


Fig. 4 Time history of mass error in water region

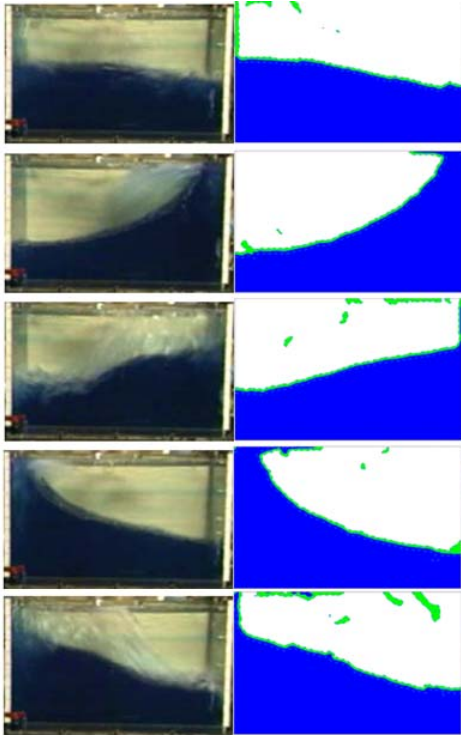


Fig. 5 Comparisons of free-surface profiles for the case of 50% filling, 2 cm and 0.858 Hz excitation: Exp. (Left), CCUP (Right)

시간에 따른 자유표면의 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 왼쪽이 실험, 오른쪽이 계산을 통해 얻은 결과이며 임의의 시간부터 1/4 주기 간격으로 한 주기 동안의 자유표면 변화를 나타내고 있다. 전체적인 유체의 거동을 유사하게 계산하고 있으며 유체의 붕괴나 탱크 벽면과 충돌 후 튀겨져 나오는 물방울들과 같은 비선형 현상들을 모사하는 것을 알 수 있다.

C2 위치에서 계측된 압력신호를 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과와 계산결과의 전체적인 경향은 일치하지만 시간이 흐를수록 두 결과 사이에 위상차가 발생하는데 이는 실험 시에 적용된 진동수가 (21)식을 통해 얻어진 고유진동수와 정확하게 일치하지 않기 때문에 나타난 현상이라 판단된다.

Fig. 7에 탱크의 천정 코너 부근(C9)에서 계측된 압력을 나타내었다. 실험 결과에서 볼 수 있듯

CCUP 기법을 이용한 2 차원 슬로싱 문제의 수치해석

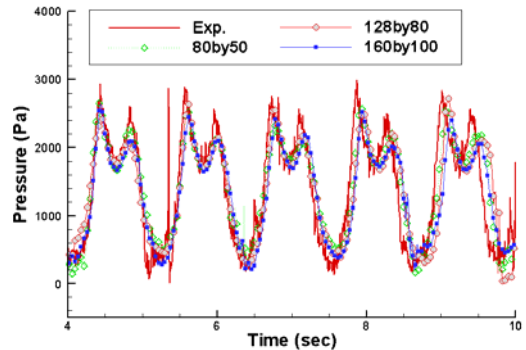


Fig. 6 Comparison of local pressure time history measured on the tank side wall for the case of 50% filling, 2cm and 0.858Hz excitation

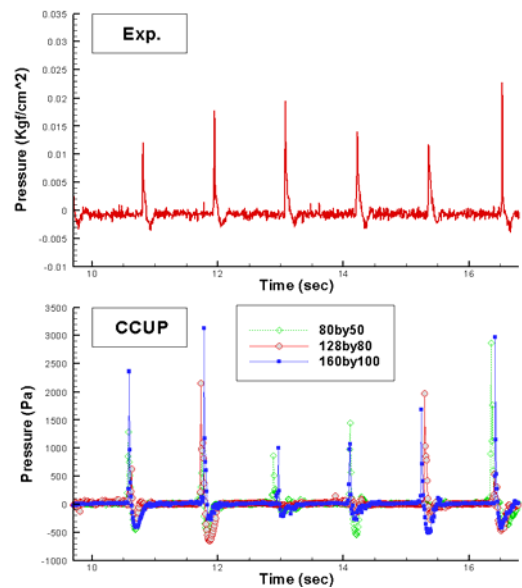


Fig. 7 Comparison of local pressure time history measured on the tank ceiling

이 탱크 천정과 부딪혀 발생하는 충격압력은 일정한 값을 가지지 않고 불규칙하게 계측 되는 것을 알 수 있다. 계산 결과에서도 이와 유사하게 일정하지 않은 충격압력이 얻어지는 것을 알 수 있다. 실험과 달리 계산 결과에서는 비교적 큰 흡입압력 (suction pressure)이 계측 되고 있다. 이는 탱크

윗면에 적용된 경계조건(No-flux condition, $v=0$) 때문에 충분히 작은 격자간격을 사용하지 않은 경우 다량의 유체가 천정에 머무르는 현상에 기인한 것이다. 탱크 천정에서의 압력 예측에는 많은 어려움이 수반되는데 앞서 설명한 흡입압력 (suction pressure) 이외에도 Fig. 8과 같이 공기 주머니(pocket)에 의한 충격완화(damping) 현상도 중요한 문제로 인식되고 있다(Kim 2007). 이에 대한 정밀한 해석을 위해서는 향후 많은 연구가 필요하다.

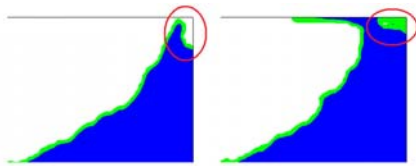


Fig. 8 Occurrence of tank-top impact and formation of air-pocket

4.2 Roll Excitation

본 계산에서는 Van Daalen et al.(1999)에 의하여 MARIN 에서 수행된 2 차원 횡 동요 운동에 대한 슬로싱 실험 모델에 대해 규칙적 주기의 횡 동요 운동을 적용하고 그 결과를 비교하였다. 이 모델은 $0.1m(l) \times 1.0m(b) \times 0.5m(d)$ 크기로서 다양한 진동수와 채워진 물의 높이, 다른 진폭 및 다른 회전 중심의 높이에 대하여 방대한 실험이 진행된 바 있다. 본 논문에서는 진폭은 0.0667(rad), 탱크의 회전 중심은 탱크 바닥에 위치한 경우에 대하여 다양한 진동수와 수심에 대한 계산을 수행, 이를 실험 결과와 비교하였다. 계산 조건은 Table 1 과 같으며, Fig. 9 는 왼쪽 벽면의 $y=0.0175$ 지점에서 계측된 압력 값을 시간에 따라 나타내고 있다. 붉은 실선으로 표시된 것이 CCUP 를 이용한 결과이고 옅은 실선으로 나타낸 것이 SPH(Nam and Kim 2006)로 계산한 결과이다. 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있고 SPH 와 달리 CCUP 를 이용한 계산 결과에는 압력 값의 진동 (oscillation) 현상이 없는 것을 확인 할 수 있다. 본 계산에 적용된 셀의 수는 100×50 이며, 초기

시간 간격은 5×10^{-4} 이다.

Table 1 Simulation conditions

Breadth (b, m)	1.0
Height (H, m)	0.5
Center of motion	$y=0.0$ (tank bottom)
Amplitude (A, rad)	0.0667
Frequency (ω , rad/s)	0.9, 1.2, ..., 3.9
Filling ratio (h/b)	0.04, 0.06, 0.08

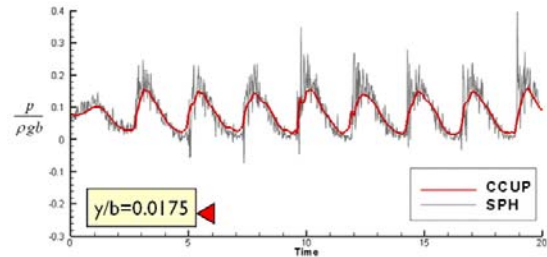


Fig. 9 Comparison of local pressure time history between CCUP and SPH: MARIN model, $A_{\phi} = 0.0667\text{rad}$, $\omega_{\phi} = 2.7$, $h/b = 0.08$

Fig. 10 은 운동중심에서 구해지는 횡동요 모멘트를 SPH 로 계산한 결과와 비교하고 있다. 두 결과에 있어 약간의 차이가 존재하지만 전반적으로 비교적 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 앞선 압력 신호에서와 마찬가지로 CCUP 의 결과에서는 비교적 매끈한 시계열(time signal)을 관찰 할 수 있다. 이러한 신호들을 각각의 수심과 주파수에 따라 얻은 뒤 횡동요 모멘트의 진폭과 위상차를 주파수에 따라 비교하여 Fig. 11과 Fig. 12 의 결과를 얻었다.

대체적으로 SPH 결과 보다 CCUP 계산에서 얻은 결과가 실험결과에 근접함을 알 수 있다. 푸리에 변환(Fourier transform)시에 15~18 주기 정도 사용하였으며 이 과정에서 발생하는 오차도 있을 수 있기 때문에 전체적인 경향을 비교해 보면 두 기법 모두 실험 결과와 유사한 값을 가지며 선박의 운동과 연성하여 계산하는 경우에 적용 가능하다고 판단된다.

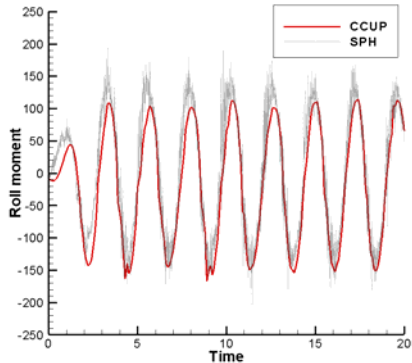


Fig. 10 Comparison of roll moment time history between CCUP and SPH (Nam and Kim 2006) results: $A_\phi = 0.0667\text{rad}$, $\omega_\phi = 2.7$, $h/b = 0.08$

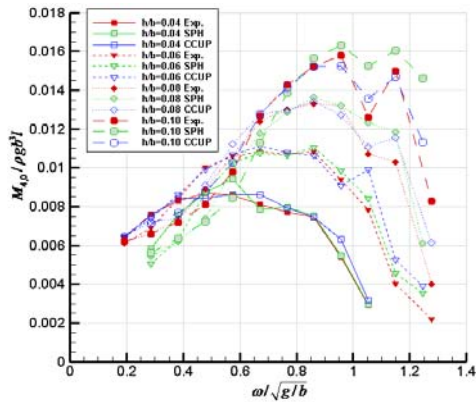


Fig. 11 Comparison of the amplitude of roll moment at different conditions

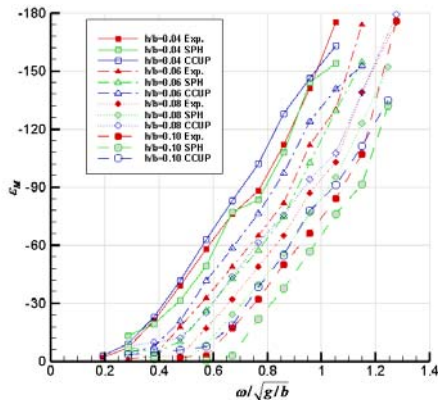


Fig. 12 Comparison of the phase of roll moment at different conditions

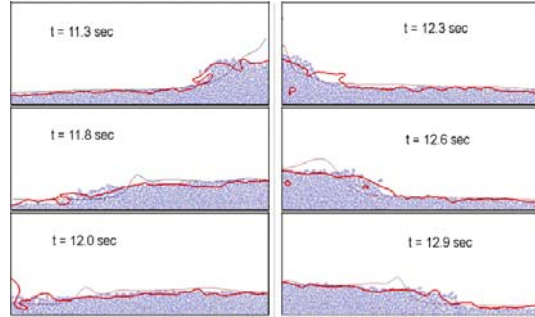


Fig. 13 Comparison of free surface profiles between CCUP, SPH and FDM: solid line: CCUP, circle particles: SPH, thin solid line: FDM

Fig. 13 에서는 본 계산에서 구해진 자유표면의 형상을 다른 수치기법의 결과들과 비교하였다. CCUP 를 이용한 결과는 SPH 를 이용한 결과와 전체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 두 기법 모두 유체의 비선형적 거동을 시뮬레이션 할 수 있기 때문이다. FDM (Kim 2004)의 경우 wave breaking 보다는 전체적인 거동에 중점을 두고 해석한 결과이기 때문에 다소 차이가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 CCUP 와 THINC 기법을 적용하여 강제 좌우동요 및 횡동요 운동에 대한 슬로싱 문제를 해석하고 그 결과들을 비교하였다. 이로부터, 다음과 같은 결론을 내리고자 한다.

- CIP 기반의 유체 해석 기법인 CCUP 기법을 적용하여 2 차원 사각형 탱크 내부의 슬로싱 문제 해석을 시도한 바, 그 효용성을 검증하였다.
- 좌우동요 운동에 대한 슬로싱 문제의 경우 전체적인 거동이 실험과 유사하였고 이에 따라 결정되는 탱크의 옆 벽면에서의 압력 또한 비교적 정확하게 계산 할 수 있었다. 하지만 탱크 천정에서 압력을 정확하게 계산하기 위해서는 공기의 압축성에 의한 영향, 수치 계산상의 경계조건에 의한 영향 등이 고려되어야 한다.
- 횡동요 운동에 대한 계산을 수행하고 횡동요 모멘트를 관찰한 바, 다른 수치 기법들과 유사한

결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 이러한 기법은 압력예측뿐 아니라, 선박운동과의 연성 등을 위한 전체적 힘과 모멘트의 예측에도 적용할 수 있다.

Acknowledgement

The present study has been supported by LRET-funded Research Center at Seoul National University for Fluid-Structure Interaction (LRETC). Prof. Hu, C. in Kyushu University provided technical guidance and advice. Authors appreciate their financial and technical support. Also authors thank the administrative support of RIMSE and ERI at Seoul National University. (LRET: Lloyd's Register Educational Trust)

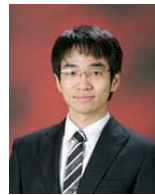
참 고 문 헌

- Cho, S., Hong, S., Kim, J. and Park, I.R., 2006, " A Numerical Study on the Coupled Dynamics of Ship and Flooding Water," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 6, pp. 631-637.
- van Daalen, E.F.G., van Doeveren, A.G., Driessen, P.C.M. and Visser, C., 1999, Two-dimensional Free Surface Anti-roll Tank Simulations with a Volume of Fluid Based Navier-Stokes Solver, Report No.15306-1-OE, MARIN.
- Faltinsen, O.M., 1978, " A Numerical Non-linear Method of Sloshing in Tanks with Two-dimensional Flow," Journal of Ship Research, Vol. 18, No. 4, pp. 224-241.
- Hu, C. and Kashiwagi M., 2004, " A CIP-based Method for Numerical Simulations of Violent Free-surface Flows," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 143-157.
- Kim, J., Kim, Y., Park, I.R., Kim, K.S. and Van, S.H., 2007, " RANS Analysis of Sloshing Induced Impact Loads." Proceedings of the Annual Autumn Meeting SNAK, 1548-1559.
- Kim, Y., 2001, " Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load," Applied Ocean Research, Vol. 23, No. 1, pp. 53-62.
- Kim, Y., 2002, " A Numerical Study on Sloshing Flows Coupled with Ship Motion-The Anti-Rolling Tank Problem," Journal of Ship Research, Vol. 46, No. 1, pp. 52-62.
- Kim, Y., 2004, Development of Sloshing Analysis Program for Three-dimensional Tanks, Consulting Report, DSME, Geoje, Korea.
- Kim, Y., 2007, " Experimental and Numerical Analyses of Sloshing Flows," Journal of Engineering Mathematics, Vol. 58, pp. 191-210.
- Kim, Y., Nam, B. and Kim, Y., 2007, " Study on the Effects of Computational Parameters in SPH Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 398-407.
- Kishev, Z.R., Hu, C. and Kashiwagi, M., 2006, " Numerical Simulation of Violent Sloshing by a CIP-based Method," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 111-122.
- Nam, B.W. and Kim, Y., 2006, " Simulation of Two-Dimensional Sloshing Flows by SPH Method," Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, May 28-June 2, pp. 342-347.
- Park, I.R. and Chun, H.H., 1999, " A Study on the Level-Set Scheme for the Analysis of the Free Surface Flow by a Finite Volume Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 36, No. 2, pp. 40-49.
- Park, I.R., Kim, K.S., Kim, J. and Van, S.H.,

- 2009, “ A Volume-of-fluid Method for Incompressible Free Surface Flows, ” International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 61, No. 12, pp. 1331-1362.
- Park, J.J., Kim, M.S., Kim, Y.B. and Ha, M.K., 2005, “ Numerical Sloshing Analysis of LNG Carriers in Irregular Waves, ” Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea, pp. 38-43.
 - Takewaki, H. and Yabe, T., 1987, “ The Cubic-interpolated Pseudo Particle (CIP) Method_ Application to Nonlinear and Multi-dimensional Hyperbolic Equations, ” Journal of Computational Physics, Vol. 70, No. 2, pp. 355-372.
 - Wu, G.X., Ma, Q.W. and Taylor, R.E., 1998, “ Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method, ” Applied Ocean Research, Vol.20, No.6, pp. 337-355.
 - Xiao, F., Honma, Y. and Kono, T., 2005, “ A Simple Algebraic Interface Capturing Scheme Using Hyperbolic Tangent Function, ” International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 48, No. 9, pp. 1023-1040.

CCUP 기법을 이용한 2 차원 슬로싱 문제의 수치해석

- Yabe, T., 1991, “ A Universal Cubic Interpolation Solver for Compressible and Incompressible Fluids, ” Shock Waves, Vol. 1, No. 3, pp. 187-195.
- Yoon, H.S., Lee, J.M., Chun, H.H. and Lee, H.G., 2008, “ A Numerical Study on the Sloshing Characteristics in a Two-dimensional Rectangular Tank Using the Level Set Method, ” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 2, pp. 131-143.



< 양 경 규 >



< 김 용 환 >