

레벨셋법을 이용한 2 차원 사각 탱크 내부의 슬로싱 특성에 관한 수치적 연구

윤현식^{†*}, 이정민^{**}, 전호환^{**}, 이현구^{***}

부산대학교 첨단조선공학연구센터^{*}
부산대학교 조선해양공학과^{**}
부산대학교 기계공학부^{***}

A Numerical Study on the Sloshing Characteristics in a Two-dimensional Rectangular Tank Using the Level Set Method

Hyun Sik Yoon^{†*}, Jung Min Lee^{**}, Hwan Ho Chun^{**} and Hyun Goo Lee^{**}

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University^{*}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University^{**}
School of Mechanical Engineering, Pusan National University^{***}

Abstract

The sloshing phenomena in a two-dimensional rectangular tank are investigated using a level set method based on finite volume method. The code validations are performed by comparing between the present results and previous numerical results, which gives a good agreement. We present the streamlines pattern, free surface shape, maximum free surface elevation and pressure fluctuation patterns in the tank under the pitch and surge motions with various frequencies. These two different motions cause the different flow structures in the tank. The time variations of surface elevation and pressure at the different locations in the tank strongly depend on the exciting frequency of tank moving.

※Keywords: Sloshing(슬로싱), Free surface(자유 표면), CFD(전산유체역학), Level set method(레벨셋법), Streamline(유선), Pressure fluctuation(압력 변동), Two-phase flow(이상 유동)

1. 서론

움직이는 탱크(tank) 내부의 슬로싱(sloshing)

문제는 광범위한 산업분야에서 중요시 되고 있다. 특히 항공, 해상, 도로 및 철도운송등에서 액체 저장 탱크 수송 시스템의 안전성 문제등에 깊은 관련이 있다. 일반적으로 슬로싱 문제를 수치해석적 방법으로 접근하는데 있어서 크게 두 가지 어려운 점이 있다. 첫째는 계산 영역(computational

접수일: 2006 년 12 월 19 일, 승인일: 2008 년 3 월 13 일

†교신저자, lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

domain)의 경계(boundary)가 움직이는 것이고, 둘째는 자유 표면(free surface)의 비선형적인 거동을 정확히 포착해 내는 것이다

슬로싱과 관련된 선행연구는 이미 여러 방법을 이용하여 다양하게 진행되어 왔다. Nakayama and Washizu(1981)는 2 차원 사각 용기 내부의 액체 슬로싱 현상을 BEM(boundary element method)을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 용기 내부의 유체는 비압축성, 비점성이라 가정하였으며, 좌우 병진(surge), 수직 병진(heave), 피칭(pitch) 운동에 따른 자유 표면의 변화를 연구하였다.

Wu et al.(1998)은 2 차원 및 3 차원 탱크 내부의 슬로싱 파형(wave)을 비선형 포텐셜 이론을 근거로 한 FEM(finite element method)를 이용하여 연구하였다. 탱크가 다양한 조건으로 수평, 수직 병진운동 할 때, 슬로싱 파형의 변화와 벽면에서의 압력 변화등을 관찰하였다. 또한 특정 조건에서는 슬로싱 파형의 변화 과정에 천이(transition) 영역이 존재함을 밝혔다.

Park and Chun(1999)은 주기적으로 진동하는 탱크 내부의 미소 표면파에 대한 연구를 위해 레벨셋법을 사용하였다. 경계면의 두께, 시간 간격, 격자수등의 변화에 따른 수치 해석 결과를 상호 비교, 분석하여 슬로싱 문제의 해법으로서 레벨셋법의 적용 가능성을 보여 주고 있다. 또한, Park and Chun(2002a, 2002b)은 움직이며 변형하는 기체-유체 경계면 근처에서의 해의 정도를 향상시키기 위하여 레벨셋 방법에 바탕을 둔 집중격자계를 도입하였으며, 복잡한 형상의 물체를 효과적으로 구현하기 위해 가상경계법을 이용하였다.

Kwak and Ko(2003)는 좌우 병진 및 피칭운동을 하는 사각탱크 내부의 슬로싱을 VOF(volume of fluid)방법을 적용하여 2 차원 수치해석을 수행하였다. 이들은 탱크 내부에 수직 또는 수평 배플을 설치한 경우의 슬로싱 감쇠 효과를 자유 표면 높이의 변위에 대한 표준편차를 도입하여 비교하였다.

Lee and Cho(2005)는 배플(baffle)이 설치된 2 차원 탱크 내부의 슬로싱 현상을 준 라그랑지 자유 표면 추적법(semi-lagrangian free surface

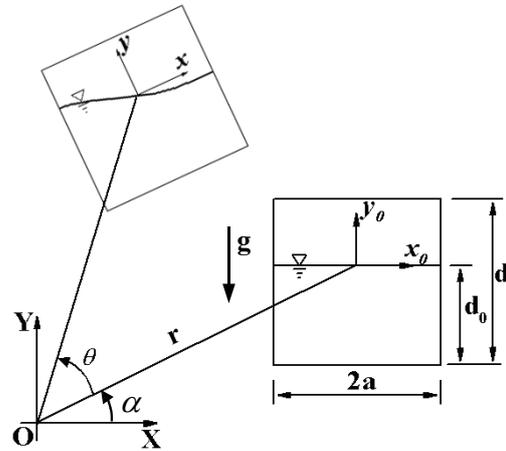


Fig. 1 Moving coordinate systems for the sloshing in a Tank.

tracking method) 을 이용하여 연구하였다.

본 연구에서는 주기적으로 진동하는 2 차원 탱크 내부의 액체 슬로싱 특성을 파악하기 위하여 이동 좌표계 (moving coordinate system)와 레벨셋법(level set method)을 이용하여 시간에 따라 움직이는 계산 경계의 이동과 자유 표면의 변화를 예측하였다.

2. 이론적 연구

2.1 지배방정식

Fig. 1 은 시간에 따라 주기적으로 진동하는 탱크의 움직임을 모사하기 위하여 사용한 이동 좌표계와 계산 영역을 나타낸다. 그림에서 $2a$ 는 탱크의 폭, d 는 탱크의 높이, d_0 는 평균 수심을 의미한다. 탱크는 중심을 기준축으로 하여 일정 각도를 주기적으로 회전 운동하는 피칭(pitch)운동과 일정 진폭으로 수평방향으로 주기적으로 움직이는 병진(surge)운동을 한다고 가정하였다.

피칭 또는 병진운동을 하는 2 차원 탱크 내부의 비압축성(incompressible), 점성(viscous) 유체의 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다(Chen and Chiang 1999, Celebi and Akyildiz 2002, Chen and Nokes 2005).

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) \\ & = -\frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu(\phi)}{\text{Re}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 u_i 는 속도 (velocity), x_i 는 좌표계 (coordinate), p 는 압력 (pressure), t 는 시간 (time), ρ 는 밀도 (density), μ 는 동점성계수 (dynamic viscosity)를 나타낸다. 그리고, 각 변수들은 특성 길이(L , characteristic length), 특성 속도($U_0 (= \sqrt{gL})$, characteristic velocity)와 특성 시간($t_0 (= \sqrt{L/g})$, characteristic time)을 이용하여 아래 식(3)과 같이 무차원화 되었다.

$$x_i = \frac{x_i^*}{L}, u_i = \frac{u_i^*}{U_0}, p = \frac{p^*}{\rho_i U_0^2}, t = \frac{t^*}{t_0} \quad (3)$$

식(2)의 무차원 변수 Re 와 Fr 은 각각 Reynolds 수와 Froude 수를 의미한다.

$$Re = \frac{\rho_i U_0 L}{\mu_i}, Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

지배방정식 (2)의 f_i 는 중력 (gravity force)과 탱크의 상대운동 (회전 및 병진운동)에 의해 유체에 작용하는 체적력(body force)을 나타내며, $x(i=1)$ 및 $y(i=2)$ 방향에 대해 각각 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\dot{\theta}v - \frac{\sin \theta}{Fr^2} + y\ddot{\theta} + x\dot{\theta}^2 - \ddot{x}_c \\ f_2 &= 2\dot{\theta}u - \frac{\cos \theta}{Fr^2} - x\ddot{\theta} + y\dot{\theta}^2 - \ddot{y}_c \end{aligned} \quad (5)$$

또한, 이상 유체(two-phase fluids)의 밀도와 점성계수는 각각 액체의 밀도 (ρ_l) 와 점성계수 (μ_l) 로 무차원화 되었다.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_l}, \mu = \frac{\mu^*}{\mu_l} \quad (6)$$

2.2 레벨셋법 (Level set method)

레벨셋법에서는 이상 유체(two-phase fluids)의 경계면(interface)을 계산하기 위하여, 부호(sign)를 가지는 거리 함수(distance function)인 $\phi(x,t)$ 를 이용한다. 이 함수는 상 경계면에서는 0(zero)의 값을, 그 경계면을 기준으로 액체측은 양(positive)의 거리 값을 그리고 기체측은 음(negative)의 거리 값을 갖게 된다.

일반적으로 기체-액체의 상 경계면(phase interface) 근처에서는 밀도와 점도등의 유체 물성치 변화가 급격하게 일어난다. 이로 인한 수치적 불안정성을 막기 위해서 상경계면의 두께(2ε) 구간내에서 Heaviside 함수($H(\phi)$)를 이용하여 경계면 근처에서는 식(7)과 같이 밀도와 점도 변화를 부드럽게 하였다 (Sussman et al. 1994).

$$\begin{aligned} \rho(x,t) &= \rho_l + (\rho_g - \rho_l)H(\phi(x,t)) \\ \mu(x,t) &= \mu_l + (\mu_g - \mu_l)H(\phi(x,t)) \end{aligned} \quad (7)$$

상경계면의 결정, 즉 ϕ 값은 아래의 Hamilton-Jacobi 형태의 방정식(8)에 의해 결정 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

위의 식(8)의 계산으로 얻어지는 해는 부호를 갖는 거리함수이나, 상 경계면으로부터 먼 곳에서는 계산된 거리 값의 정확도가 다소 낮아지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 재초기화(re-initialization) 과정이 필요하다. 본

연구에서는 Sussman et. al(1998)에 의해 제안된 재초기화 방법을 사용하였다.

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + s(d_0)(|\nabla d| - 1) = \lambda \delta(\phi) |\nabla \phi| \quad (9)$$

$$s(d_0) = \frac{d_0}{\sqrt{d_0^2 + (|\nabla d_0| \varepsilon)^2}} \quad (10)$$

여기서, τ 는 가상 시간, ϕ_0 는 재초기화를 위한 초기값, λ 는 질량 손실을 보정하기 위해 사용되는 계수이다 (Yue et al. 2003).

식(8)은 공간적으로는 3 차 정확도의 ENO(essentially non-oscillatory) 법을 사용하였고, 시간에 대해서는 3 차 정확도의 TVD Runge-kutta scheme 을 적용하였다(Yue et al. 2003, Sussman et al. 1999, Shu and Osher 1989). 그리고 상경계면 근처에서만 국부적으로 레벨셋법을 적용하여 계산의 효율성을 높였다 (Peng et al. 1999).

2.3 수치해석 방법

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(Zang et al. 1994). 대류항은 QUICK (quadratic upstream interpolation convective kinematics) 기법을, 확산항등은 중심차분(central difference)법을 사용하여 이산화 하였다(Perng and Street 1991).

시간 진행은 Kim and Moin(1985) 등이 제안한 Fractional-step method 를 이용하였으며, 확산항은 Crank-Nicolson scheme 을, 비선형항과 외력항등은 2 단계 Adams-Bashforth scheme 을 적용하였다.

Fig. 2 는 본 연구에 사용된 격자계를 나타낸 그림이다.

격자는 자유 표면 예측의 정확도를 증가 시키기

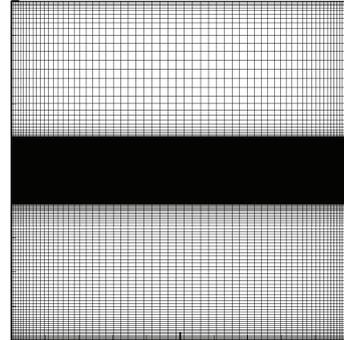


Fig. 2 Grid system

위하여, 자유 표면 근처에 격자를 집중시켰다. 또한 벽면 근처의 급격한 속도구배를 고려하여 벽면 근처로 격자를 집중시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Code 검증

본 연구에 사용된 코드(code)의 정확도를 검증하기 위하여 피칭 운동과 병진 운동에 대한 해석 결과를 선행 연구 결과와 상호 비교하였다.

비교에 사용된 탱크의 형상과 경계조건등은 선행연구와 동일하게 하였다. 즉, 탱크 폭(2a)은 0.9, 물 깊이(d₀)는 0.6 이다. 그리고 벽면에서는 미끄럼(slip) 경계조건을 사용하였다. 탱크는 각각 주기적으로 피칭 운동($\theta(t) = \Theta_0 \cos(\omega_p t)$, $\Theta_0 = 0.8 \text{ deg.}$, $\omega_p = 18.158$) 과 병진운동($x(t) = a_0 \sin(\omega_s t)$, $a_0 = 0.002$, $\omega_s = 15.158$)을 한다.

Fig. 3 은 탱크 좌측 벽면에서의 시간에 따른 자유 표면의 높이 변화를 비점성(invicid) 유동에 대한 Nakayama et al.(1981)의 BEM(Boundary Element Method)해석 결과와 비교한 것이다. 피칭과 병진운동, 두 경우 모두 본 연구에 사용된 코드의 해석결과와 Nakayama et. al.(1981)의 비점성 해석는 잘 일치 함을 알 수 있다. 특히 Re 가 10⁴ 이상에서는 비점성 해석 결과와 유사하다. 그러나 Re 가 10³ 에서는 점성효과(viscous effects)에 의해 시간이 진행되면서 자유 표면의

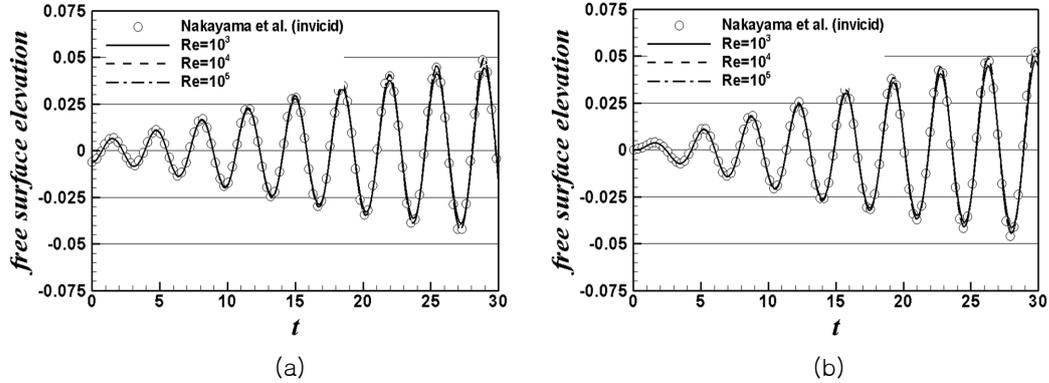


Fig. 3 Free surface elevation at the left wall for (a) pitch motion and (b) surge motion.

진폭이 비점성해석 결과에 비하여 상대적으로 작아지는 비선형 슬로싱 특성을 본 코드에서 잘 예측하고 있음을 알 수 있다 (Chen and Nokes, 2005).

3.2 자유 표면의 형상 및 유선분포

본 연구에서는 병진 및 피칭운동에 따른 슬로싱 특성을 관찰하기 위하여 폭($2a$)이 1.0, 물 깊이(d_0)가 0.5 인 탱크를 대상으로 하였다. 벽면은 점착(no-slip) 경계조건을 사용하였고 탱크 내부 유동은 Re 가 10^4 인 조건이 사용되었다. 그리고, 비점성 해석을 위한 무차원 시간 간격은 0.00025 로 완전히 발달한 유동의 CFL 조건이 0.3 보다 작은 값에 해당한다

탱크는 피칭운동의 경우 주기 ω_p , 최대 피칭각도 $\Theta_0 = 2.0\text{deg}$ 의 조건으로 시간에 따라 아래 식(11)과 같이 움직인다.

$$\theta(t) = -\Theta_0 \cos(\omega_p t) \quad (11)$$

그리고, 병진운동은 주기 ω_s , 최대 진폭 $a_0 = 0.0015$ 의 특성을 가지며, 시간에 따라 식(12)의 조건으로 움직인다.

$$x(t) = a_0 \sin(\omega_s t) \quad (12)$$

진동하는 사각 탱크 내부의 유체는 고유진동수

(natural frequency)를 가지며, 그 값은 아래 식(13)에 의해 계산할 수 있다 (Lamb 1932).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi d_0}{2a}\right)} \quad (13)$$

여기서, n 은 n 번째 모드(mode)를 의미한다.

Table 1 에서는 5 개의 대표적인 고유진동수를 무차원화 하여 나타내었다. fr 은 첫 번째 고유진동수인 ω_1 과의 가진 주파수 비(frequency ratio, $fr = \omega/\omega_1$)를 의미한다.

Fig. 4 는 탱크가 피칭운동($\omega_p = 15.818$)을 하는 경우, Fig. 5 는 탱크가 좌우 병진운동($\omega_s = 15.818$)을 하는 경우에 대하여 각각 자유 표면의 형상 변화와 액체 영역에서의 유선(stream-line)의 변화를 한 진동 주기(one oscillation period)에 대해서 일정한 시간 간격으로 나누어

Table 1. Natural frequency and frequency ratio for the tank

n	ω_n	fr
1	16.651	1.0
2	30.112	1.81
3	38.877	2.33
4	46.000	2.76
5	52.159	3.13

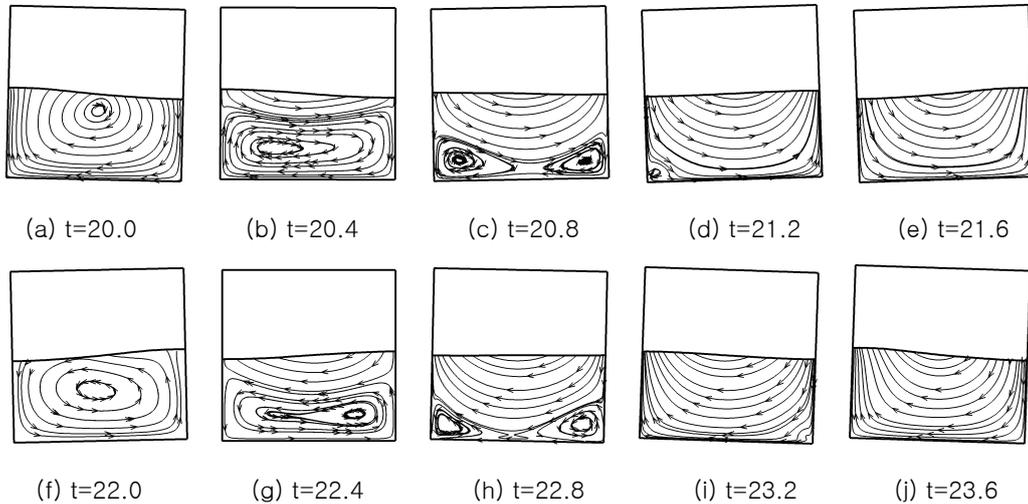


Fig. 4 Free surface shape and streamlines in the water region during one period of pitch motion.

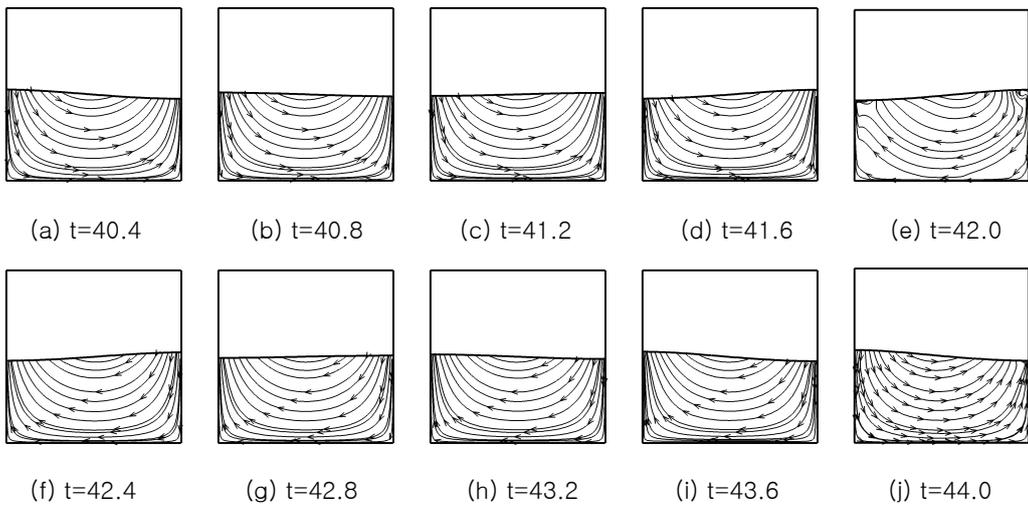


Fig. 5 Free surface shape and streamlines in the water region during one period of surge motion.

나타낸 것이다. 피칭운동의 경우, Fig 4(a)에서 우측 벽면의 수위는 가장 낮아지며, 이 때의 유선을 관찰하면 액체 내부에서는 시계방향의 와(eddy)가 생성됨을 알 수 있다. 그리고 시간이 진행되면서 탱크의 피칭운동에 의해 내부의 와는 바닥쪽으로 이동되어 두개의 와로 분리되고 탱크 모서리로 이동되면서 소멸된다(Fig. 4(b)-(d)). 이러한 과정과

함께 자유 표면 근처에서는 반 시계방향의 와가 새롭게 생성되고, 우측 벽면의 수위는 다시 상승하게 된다. 주기적인 탱크의 움직임에 따라 반 시계 방향의 와는 이전의 과정과 유사하게 아래로 이동하여 두 개의 와로 분리되고, 소멸되는 과정을 반복하게 됨을 Fig.4 (f)-(j)에서 잘 관찰 할 수 있다. Fig. 5 에서는 탱크가 병진운동을 할 때, 시

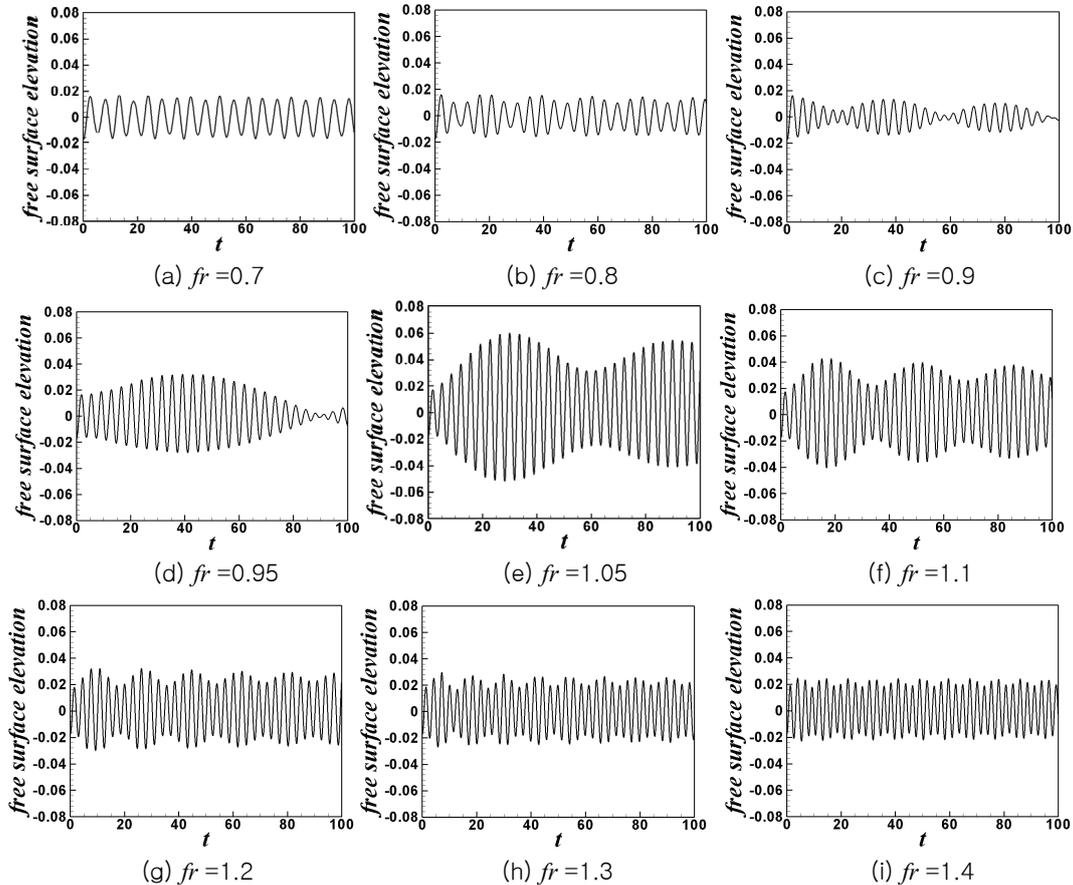


Fig. 6 Time histories of free surface elevation at the left wall under pitch motion with various frequency ratios.

간에 따른 자유 표면의 형상변화와 액체 내부의 유선 변화등을 관찰 할 수 있다. Fig. 5(a)에서는 우측 벽면의 수위가 낮아졌다가, 시간이 지남에 따라 서서히 증가하고 $t=42.0$ 부근(Fig. 5(e))에서 최고 수위에 도달한 후 다시 하강하게 된다. 유선 변화를 보면 병진운동에서 수면 아래의 유동 패턴은 피칭운동의 복잡한 유동 패턴 변화와는 달리 상대적으로 단조롭다. 피칭운동에서 볼 수 있었던 와의 회전 중심이 나타나지 않으며, 와의 분리 또는 소멸 현상 또한 나타나지 않는다. 다만 탱크의 주기적인 운동에 따라 시계방향과 반시계방향의 유체 흐름이 주기적으로 형성된다.

3.3 진동 주기 변화에 따른 슬로싱 특성

Fig. 6과 7은 각각 탱크가 피칭 및 병진운동을 할 때, 탱크의 진동 주파수 변화에 따른 좌측 벽면에서의 자유 표면의 높이 변화를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 탱크의 진동 주파수가 증가할수록 자유 표면의 높이 변동 주기는 짧아진다. 그리고, 탱크의 진동 주파수가 첫 번째 고유 주파수 ($\omega_1=1$) 근처로 다가감에 따라 변동 폭은 증가한다. 특히 주파수비(fr)가 1 근처에서는 맥놀이(beating) 현상이 뚜렷하게 나타나며, 그 첫번째 주기에서 자유 표면의 높이는 가장 높고 서서히 감소된다.

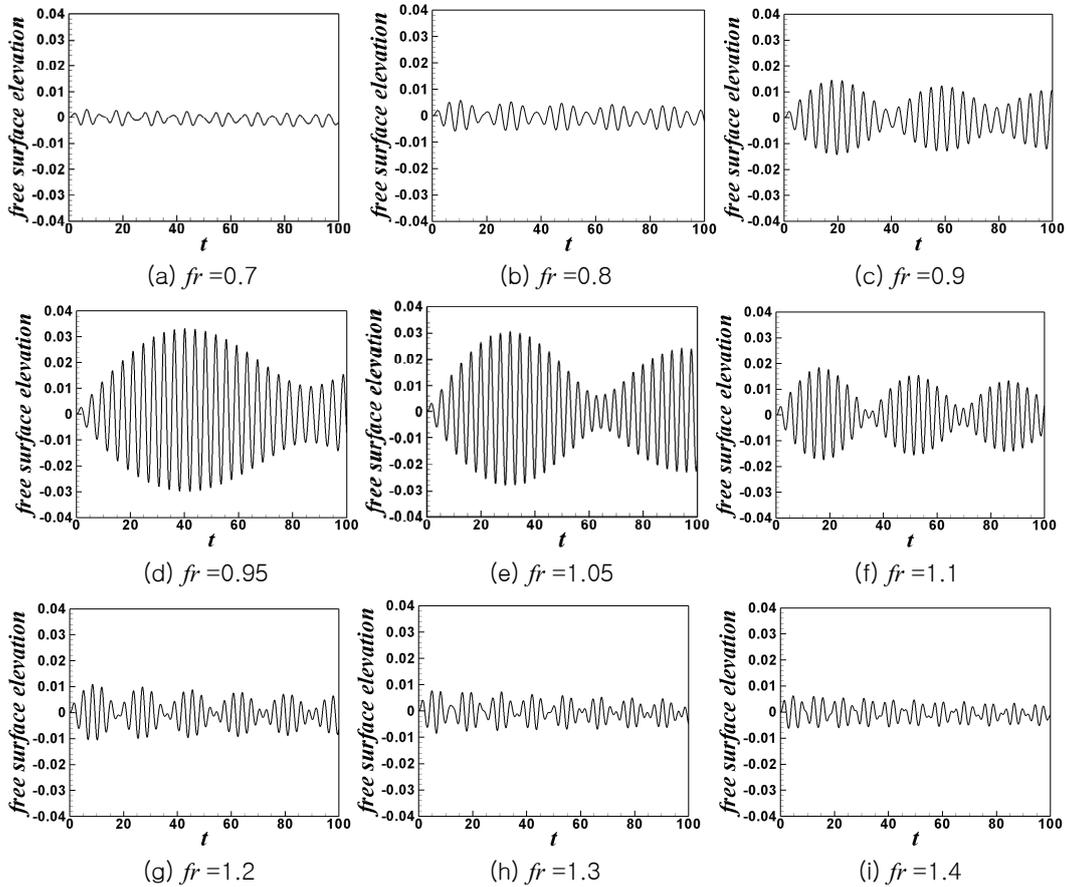


Fig. 7 Time histories of free surface elevation at the left wall under surge motion with various frequency ratios.

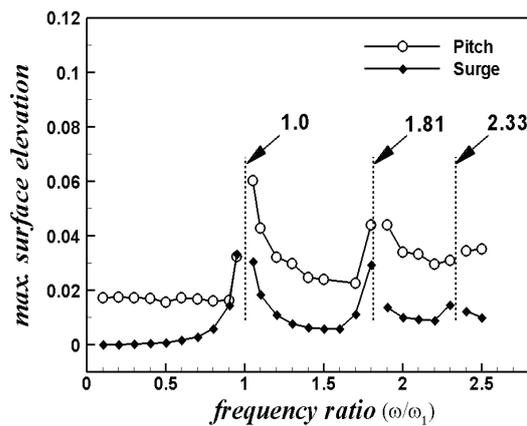


Fig. 8 Maximum surface elevation at the left wall with different frequency ratio.

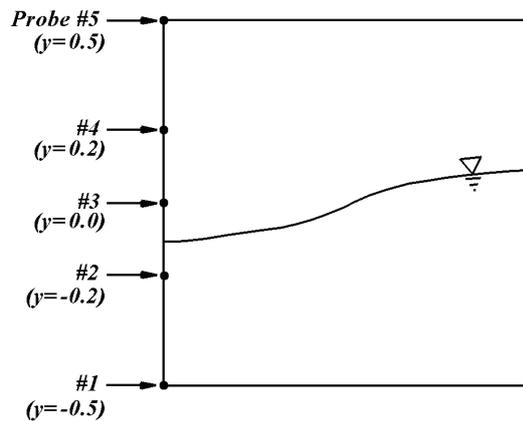


Fig. 9 Pressure probe location

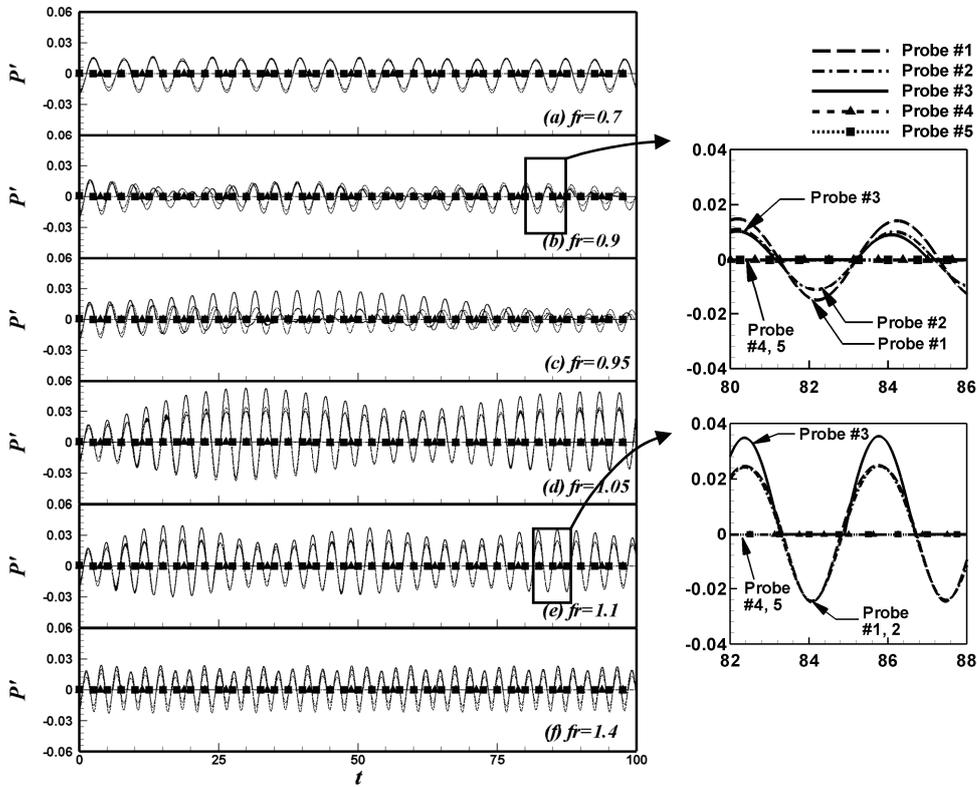


Fig. 10 Time histories of pressure at the different locations for pitch motion

Fig. 8은 좌측 벽면에서의 최대 자유 표면 높이를 탱크의 진동 주파수 변화에 따라 나타낸 것이다. 탱크의 진동 주파수가 Table 1에 나타낸 탱크의 고유 진동수 ($fr=1, 1.81, 2.33$)에 근접하면 자유 표면의 최대 높이가 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

3.4 벽면 압력 변동

탱크의 운동에 따른 내부의 압력 변동 특성을 파악하기 위하여 탱크의 모서리를 포함한 좌측 벽면 5 군데의 압력 변동을 시간의 변화에 따라 관찰하였다. 압력 변동을 측정된 위치는 Fig. 9에 나타내었다. 탱크의 주기적인 운동에도 불구하고 Probe #1, #2는 항상 액체 상태에 노출되어 있으며, Probe #3의 위치(정지된 상태에서의 자유 표

면의 위치)에서는 탱크의 운동 상태에 따라 기체 상태와 액체 상태에 번갈아 가며 놓이게 된다. 그리고 Probe #4, 5는 항상 기체 상태에 위치하게 된다. Fig. 10과 11은 탱크가 각각 피칭운동과 병진운동을 하는 경우의 벽면 압력 변동을 시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 10과 11에서 표현된 압력은 중력의 영향으로 인해 형성되는 정수압(static pressure)을 제외한 압력($p' = p - p_{static}$)이다(Wu et. al. 1998). Fig. 10의 피칭운동의 경우, 압력 변동 폭은 탱크의 진동 주파수가 고유 주파수에 가까워지면, 자유 표면 높이 변화에서와 유사하게 커지고, 맥놀이 현상 또한 나타난다. 좀 더 자세한 압력 변동 패턴을 관찰하기 위하여, 진동 주파수비(fr)가 0.9와 1.1의 경우에 대하여 확대된 그림을 우측에 나타내었다. 확대된 그림을 보

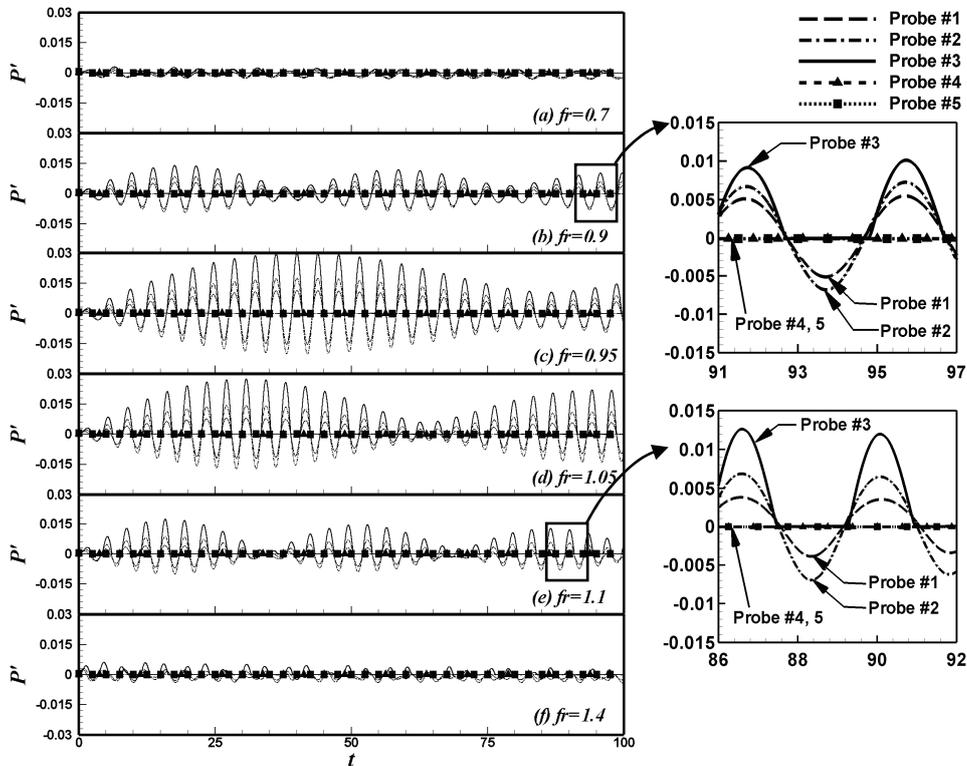


Fig. 11 Time histories of pressure at the different locations for surge motion

면, 기체상태(Probe #4, 5)에서의 압력 변동폭은 액체상태에서의 그것과 비교하면 상대적으로 매우 작다. 이러한 현상은 액체상태와 기체상태를 주기적으로 반복하는 위치(Probe #3)에서의 압력변동에서 잘 나타난다. 자유 표면이 Probe #3의 위치보다 높아지면(액체상태) 압력 변동폭은 증가하며, 자유 표면이 아래로 내려가면(기체상태) 그 변동폭은 매우 작아진다. 그러나 액체 상태에 놓여진 벽면(Probe #4, 5)에서는 그 변동이 주기적으로 반복되며 그 폭 또한 상대적으로 크다. 그리고 위치에 따른 압력 변동은 진동 주파수에 따라 그 특성이 달라진다. 진동 주파수비(f_r) 0.9에서는 Probe #1의 압력 변동폭이 Probe #2에서의 값보다 크지만, 주파수비가 1.1의 경우는 거의 같다. 또한 $f_r=0.9$ 에서는 Probe #1에서의 압력 변동

폭이 가장 크지만 $f_r=1.1$ 에서는 Probe#3의 변동폭이 가장 크다.

Fig. 10의 피칭운동의 경우는 $f_r=1.05$ 에서 압력의 변동폭이 가장 컸으나, Fig. 11의 병진운동의 경우는 $f_r=0.95$ 에서의 압력변동폭이 가장 크게 나타났다. 그리고 피칭운동에서는 진폭이 가장 낮은 $f_r=0.7$ 과 가장 큰 진폭을 갖는 $f_r=1.05$ 의 진폭비가 약 3.3배 정도이나, 병진운동의 경우 $f_r=0.7$ 과 $f_r=0.95$ 에서의 압력 변동폭이 약 12.9배 정도로 크게 나타났다. Fig. 11의 확대된 그림을 보면 $f_r=0.9$ 와 1.1의 경우 모두 피칭운동의 경우와 달리 Probe #3에서의 압력변동폭이 가장 크다. 그리고, Probe #2의 진폭이 #1의 값보다 더 큰 것은 피칭운동과는 다른 특성이다. 이와 같이 피칭운동과 병진운동의 슬로싱 특성이 다

른 경향을 나타내는 것은 Fig. 5 와 6 에서 볼 수 있듯이 시간에 따라 탱크 내부에서 형성되는 서로 다른 유동 구조에 기인한 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 주기적으로 진동하는 탱크내부의 슬로싱 특성을 파악하기 위하여 유한체적법을 기반으로 한 레벨셋법을 이용하여 자유 표면을 포함하는 이상 유동 해석을 수행하였다. 주요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 2 차원 사각 탱크가 주기적으로 피칭 및 병진 운동을 할 때, 시간에 따른 탱크 내부의 유동 구조, 자유 표면의 변화, 벽면에서의 압력 변동등을 탱크의 진동 주파수를 변화시켜 가면서 관찰하였다.

(2) 본 연구에 사용된 해석 코드의 정확도를 검증하기 위해서 선행 연구 결과와의 비교 실시하였으며, 그 결과 점성 및 비점성 슬로싱 특성을 잘 예측함을 확인하였다.

(3) 탱크가 피칭운동을 하는 경우, 탱크의 운동 방향에 따라 주기적으로 자유 표면 근처에서 시계 및 반 시계 방향의 와가 생성되어 탱크 바닥으로 이동하고 분리, 소멸되는 과정을 주기적으로 반복한다. 반면 병진운동을 하는 경우, 주기적으로 와가 생성되는 것은 피칭운동의 경우와 유사하나 분리, 소멸되는 현상은 나타나지 않았다.

(4) 탱크의 진동 주파수가 고유 주파수에 근접할 때 자유 표면의 높이, 압력 변동으로부터 맥놀이 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 또한 자유 표면의 최대 높이와 압력 변동폭이 급격히 증가한다.

(5) 피칭운동과 병진운동은 서로 다른 슬로싱 특성을 나타내며, 이는 자유 표면 아래에서의 유동 구조와 밀접한 관련이 있는 것으로 예상된다.

Eulerian 접근법으로써 고정 격자를 이용한 레벨셋 방법을 적용하여 진동하는 탱크 내부의 상세한 유동 정보를 획득하였다. 향후 보다 다양한 탱크의 형상과 경계 조건 변화 및 3 차원 해석 등을 통하여 연구 결과의 산업 활용 가능성을 높이고자 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 부산대학교 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Celebi, M.S. and Akyildiz, H., 2002, " Nonlinear Modeling of Liquid Sloshing in a Moving Rectangular Tank," Ocean Eng., Vol. 29, pp. 1527-1553.
- Chen, B.F. and Chiang, H.W., 1999, " Complete 2D and Fully Nonlinear Analysis of Ideal Fluid in Tanks," J. Eng. Mech., Vol. 125, No. 1, pp. 70-78.
- Chen, B.F. and Nokes, R., 2005, " Time-Independent Finite Difference Analysis of Fully Non-linear and Viscous Fluid Sloshing in a Rectangular Tank," J. Comput. Phys., Vol. 209, pp. 47-81.
- Kim, J. and Moin, P., 1985, " Application of a Fractional-step Method to Incompressible Navier-stokes Equations," J. Comput. Phys., Vol. 59, pp. 308-323.
- Kwak, Y.K. and Ko, S.H., 2003, " Computational Fluid Dynamics Study on Two-Dimensional Sloshing in Rectangular Tank," The Korea Society of Mechanical Engineers B, Vol. 27, No. 8, pp. 1142-1149.
- Lamb, S.M., 1932, Hydrodynamics, Dover Publications, Inc., NewYork
- Lee, H.W. and Cho, J.R., 2005, " Characteristic Analysis of Nonlinear Sloshing in Baffled Tank," The Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 29, No. 3, pp. 1455-1462.
- Nakayama, T. and Washizu, K., 1981, " The Boundary Element Method Applied to the Analysis of Two-dimensional Nonlinear Sloshing Problems," Int. J. Numer. Meth.

- Eng., Vol. 17, pp. 1631–1646.
- 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. and Chun, H.H., 2002a, “ Basic Analysis of Bubble Behavior in the Viscous Flow Domain with the Free Interface,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 39, No. 1, pp. 16–27.
 - Park, I.R. and Chun, H.H., 2002b, “ A Study on a Moving Adaptive Grid Generation Method Using a Level-set Scheme,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 39, No. 3, pp. 18–27.
 - Peng, D., Merriman, B., Osher, S., Zhao H. and Kang, M., 1999, “ A PDE-Based Fast Local Level Set Method,” J. Comput. Phys., Vol. 155, pp. 410– 438.
 - Perng, C.Y. and Street, R.L., 1991, “ A Coupled Multigrid-domain-splitting Technique for Simulating Incompressible Flows in Geometrically Complex Domains,” Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 13, pp. 269–286.
 - 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. Comput. Phys. 114, pp. 146–159.
 - Sussman, M.S., Fatemi, E., Smereka, P. and Osher, S., 1998, “ An Improved Level Set Method for Incompressible Two-phase Flows,” Comput. Fluids, Vol. 27, pp. 663–680.
 - 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,” Appl. Ocean. Res., Vol. 20, pp. 337–355.
 - 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.
 - Zang, Y., Street and R.L. and Koseff, J.R., 1994, “ A Non-staggered Grid, Fractional Step Method for Time-Dependent Incompressible Navier-Stokes Equations in Curvilinear Coordinate,” J. Comput. Phys., Vol. 114, pp. 18–33.



< 윤 현 식 >



< 이 정 민 >



< 전 호 환 >



< 이 현 구 >