

SPH 기법의 계산인자 민감도에 대한 연구

김유일*, 남보우** 김용환†*

서울대학교 공과대학 조선해양공학과*
한국해양연구원 해양시스템안전연구소**

Study on the Effects of Computational Parameters in SPH Method

Yooil Kim*, Bowoo Nam** and Yonghwan Kim†*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*
Maritime and Ocean Engineering Research Institute**

Abstract

A smoothed particle hydrodynamics (SPH) method is applied for simulating two-dimensional free-surface problems. The SPH method based on the Lagrangian formulation provides realistic flow motions with violent surface deformation, fragmentation and reunification. In this study, the effect of computational parameters in SPH simulation is explored through two-dimensional dam-breaking and sloshing problem. The parameters to be considered are the speed of sound, the frequency of density re-initialization, the number of particle and smoothing length. Through a series of numerical test, detailed information was obtained about how SPH solution can be more stabilized and improved by adjusting computational parameters. Finally, some numerical simulations for various fluid flow problem were carried out based on the parameters chosen through the sensitivity study.

※Keywords: SPH, Dam-breaking problem(댐 붕괴 문제), Sloshing problem(슬로싱 문제), Sensitivity study(민감도 해석), Particle method(입자 방법)

1. 서론

Monaghan(1994)의 시도 이후 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 기법을 적용한 자유표면

파 문제의 많은 해석들이 소개되고 있다. 최근 들어 Colagrossi et al. (2003)은 물 뿐만 아니라 공기를 함께 고려하여 그 때 생기는 경계면에서의 변화를 연구하였고, 또한 수치적 안정성을 위해 밀도를 재설정하는 기법을 적용하였다.

Iglesias et al.(2004)은 SPH 방법으로 3 차원 슬로싱 문제를 고려하였고, Oger et al.(2006)는 2 차

접수일: 2006년 12월 29일, 승인일: 2007년 6월 14일

† 교신저자: yhwankim@snu.ac.kr, 02-880-9226

원 뼈기의 입수문제를 연구하는데 SPH 방법을 이용하였다. 그들은 안정된 압력을 얻기 위한 방법으로 압력값을 센서의 크기에 걸쳐 평균하는 압력센서개념을 제시하였다. 이와 같이 SPH 는 매우 강한 비선형성을 가진 문제에 효율적으로 적용되어 왔다. 본 연구에서는 SPH 를 자유표면 문제에 적용할 때 안정된 해를 구하기 위해 여러 가지 수치 변수에 따른 해의 민감도에 대해 살펴보았다. 이를 바탕으로 댐 붕괴 문제와 솔로싱 문제에 대한 보다 안정적인 해를 얻고자 하였으며, 기존의 이용 가능한 실험결과와 비교해봄으로써 자유표면문제의 해석에서 SPH 기법이 가질 수 있는 가능성과 한계를 살펴보려고 하였다.

2. 이론적 배경

SPH 방법에서는 함수의 값을 kernel 함수를 도입하여 근사화하고, 적분은 분포되어 있는 입자들을 통해 이루어진다.

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} f(\mathbf{y})\delta(\mathbf{x}-\mathbf{y})dV \\
 &\approx \int_{\Omega} f(\mathbf{y})W(\mathbf{x}-\mathbf{y};h)dV \\
 &\approx \sum_j f(x_j)W(x-x_j;h)\frac{m_j}{\rho_j}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $W(\mathbf{x}-\mathbf{y};h)$ 는 일종의 수치 Dirac delta 함수로서 kernel 함수 또는 완화 함수(smoothing function)로 불린다. 이후의 모든 시뮬레이션은 여러 가지 형태의 kernel 함수 중 안정성 있고, 효율적인 Gaussian kernel 이 사용되었다.

$$W(\mathbf{x}-\mathbf{y},h) = \frac{1}{\pi h^2} e^{-\left(\frac{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}{h}\right)^2} \tag{2}$$

위의 식에서 h 는 완화 거리(smoothing length)를 나타내고, 근사화하는 영역의 크기를 결정해 준다.

위의 SPH 방법을 통한 근사를 이용하여 비점성, 약한 압축성 유체에 대한 지배방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = -\rho_i \sum_j (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \cdot \nabla W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \tag{3}$$

$$\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_j (p_j + p_i + \Pi_{ij}) \nabla W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} + \mathbf{F}_i \tag{4}$$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{u}_i \tag{5}$$

여기서 ρ_i , \mathbf{u}_i , \mathbf{x}_i 는 각각 i 번째 입자의 밀도와 속도, 위치를 나타낸다. \mathbf{F}_i 는 외부 힘을 표시한다. 압력 p_i 는 비압축성이라는 조건 대신 약한 압축성이라는 가정 하에 아래의 상태방정식으로부터 구해진다. (Bachelor 1974)

$$p = B \left(\left[\frac{\rho}{\rho_0} \right]^\gamma - 1 \right), B = \frac{\rho_0 c^2}{\gamma} \tag{6}$$

여기서 ρ_0 는 기준 밀도를, n 은 무차원 상수로서 물에 대해서는 7.0 을 사용한다. 그리고 B 는 풀고자 하는 문제에 따라 결정되는 상수로 유체의 음속과 관련된 값이다. 유체의 음속은 비압축성의 조건을 근사적으로 만족하기 위해 일반적으로 마하수(Mach Number)가 0.1 이하가 되도록 결정한다. 상태방정식을 도입하지 않고 압력-포아송 방정식을 푸는 방법도 있으나, 상대적으로 계산효율 면에서는 불리한 단점을 가지고 있다. 초기 밀도 조건은 정압력이 형성되도록 다음 값을 사용하였다.

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{\rho_0 g(H-y)}{B} \right)^{1/n} \tag{7}$$

운동량 방정식 (4)에서 Π_{ij} 는 가상 점성항으로 본 계산에서는 Monaghan 에 의해서 도입된 다음의 형식을 이용하였다.

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} -\alpha \mu_{ij} \frac{c_i + c_j}{\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_j}} & (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) < 0 \\ 0 & (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \geq 0 \end{cases} \tag{8}$$

여기서,

$$\mu_{ij} = \frac{h(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2 + \eta^2} \tag{9}$$

c 는 음속이며 η 는 수치적으로 발산하는 것을 막기 위해 도입된 작은 숫자이며, 본 계산에서는 $0.1h$ 의 값을 사용하였다. η 는 상수값으로 일반적으로 0.03 의 값을 가진다. 마하수에 따라 결정되는 음속은 입자마다 다른 값을 가질 수 있으나 본 계산에서는 전 유체장에 걸쳐 일정하게 적용하였다.

벽면에서의 비침투 조건을 만족 시켜주기 위해 매 시간마다 벽면 근처의 입자를 대칭 시켜서 가상 입자(ghost particle)를 경계면 밖에 두었다. 가상 입자와 실제 입자 사이의 관계는 다음과 같다.

$$p_{ghost} = p_i, \mathbf{x}_{ghost} = 2\mathbf{x}_{wall} - \mathbf{x}_i$$

$$\mathbf{u}_{ghost} \cdot \mathbf{n} = 2\mathbf{U}_{wall} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{n}, \mathbf{u}_{ghost} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{t} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{n} 과 \mathbf{t} 는 각각 벽면에서의 법선 벡터와 접선 벡터이며, \mathbf{U}_{wall} 는 벽면의 속도를 나타낸다.

시뮬레이션을 수행하다 보면 질량과 밀도, 부피 사이의 관계를 정확하게 맞추기가 어렵다. 그래서 주기적인 시간마다 식(11)을 통해 밀도를 새로 구함으로써 질량, 밀도, 부피 사이의 관계를 회복할 수 있다. (Colagrossi and Landrini 2003)

$$\rho_i = \sum_j m_j W_{ij} \quad (11)$$

경계근처에서는 주변 입자의 수가 부족하기 때문에 식(10)은 오류를 야기한다. 따라서 식 (10) 대신 다음 식을 사용하여 밀도를 재설정하였다.

$$\langle \rho_i \rangle = \frac{\sum_j m_j W_{ij}}{\sum_j \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij}} \quad (12)$$

SPH 기법은 수치기법의 특성상 instability 문제를 기본적으로 안고 있다(Swegel et al. 1995). 이는 kernel 함수의 형상과 운동방정식을 풀어나가는 방식에 기인하게 되는데 결과적으로 입자들이 운동 도중에 서로 뭉치는 현상으로 나타나게 된다. 비압축성 유동해석의 경우 음압이 나타나는 경우 발생하는 tensile instability가 일반적 현상으로, Monaghan(2000)은 이러한 문제를 해결하기 위해

식(13)과 같이 운동량 보존 방정식에 인위적인 척력 항을 추가할 것을 제안하였다.

$$\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} + Rf_{ij}^n \right) \nabla_i W_{ij} \quad (13)$$

여기서, f_{ij} 는 입자간에 작용하는 척력을 나타내며, R 은 비례상수를 나타낸다.

3. 수치기법의 검증 및 적용

3.1 댐붕괴 문제

Fig. 1에 보인 2차원 댐붕괴 문제에 대한 해석을 수행하였으며, 관련된 실험데이터와 여타의 연구자들에 의한 계산결과와의 비교작업을 수행하였다.

Fig. 2는 댐붕괴 문제에서의 입자들의 시간 별 거동을 나타낸다. 붕괴가 시작된 후 0.6초가 지나면서 댐의 첨부가 오른쪽 벽면과 충돌하게 되고 이어 벽면을 따라 수직 상승한다. 상승하던 유체는 다시 뒤집히면서 자유수면과 충돌하게 되고 다시 상승하게 된다. 이러한 일련의 과정은 일반적으로 댐붕괴 실험에서 전형적으로 관찰되는 현상으로 SPH 기법을 이용한 해석이 댐붕괴 현상의 유동을 정확히 재현해 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 1은 실험으로부터 얻어진 결과 및 여타의 연구자들에 의한 계산결과와 본 논문에서 계산된 결과를 비교한 것이다. 댐 높이의 시간이력은 실험 및 계산결과 간 차이가 거의 없이 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

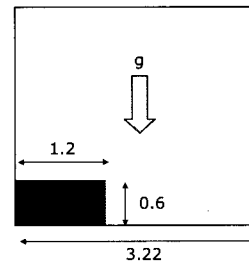


Fig. 1 Initial water column for dam-breaking problem

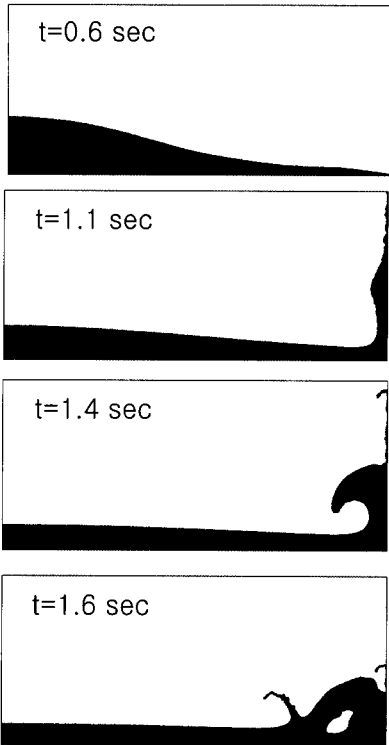


Fig. 2 Time evolution of particle

Table 1 Dam height and surging front

t	Dam height			Surging front		
	Exp.	Ref ¹ / Ref ²	This study	Exp.	Ref ¹ / Ref ²	This study
0.7	0.90	0.90/ 0.90	0.90	1.33	1.56/ 1.45	1.55
1.4	0.76	0.75/ 0.75	0.75	2.25	2.50/ 2.38	2.50
2.1	0.57	0.56/ 0.56	0.57	3.22	3.75/ 3.50	3.72

Ref¹ by Monaghan(1994), Ref² by Liu and Liu(2003)

댐 끝단 위치의 시간이력은 실험결과와 해석결과 간 약간의 차이를 보이고 있으나, 댐 끝단 부근의 국부적인 유동에 의한 불확실성을 고려한다면 수치계산에 의한 결과가 비교적 좋은 결과를 주는 것으로 생각할 수 있다. 댐 끝단 위치에서의

실험과 해석의 차이는 바닥면에 free slip 경계조건이 상대적으로 빠른 유속의 효과와 동반된 결과로 판단된다.

3.2 슬로싱 문제

Fig. 3 은 횡방향 동요를 받는 사각탱크내의 슬로싱 유동을 관찰하기 위한 모델을 나타낸다. 탱크의 강제동요는 슬로싱의 고유주기와 일치하는 주파수로 가진되었으며, 횡방향의 최대변위는 20mm 이다.

Fig. 4 는 실험 및 수치해석으로부터 얻어진 유동의 순간적인 형상을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 SPH 를 이용한 해석결과가 실험에서 나타난 자유수면의 형상을 잘 재현함을 확인할 수 있다.

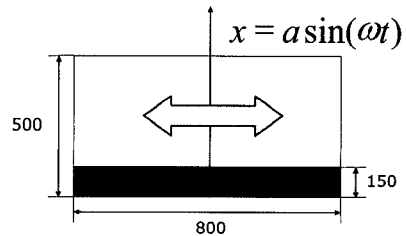


Fig. 3 Sloshing problem [mm]

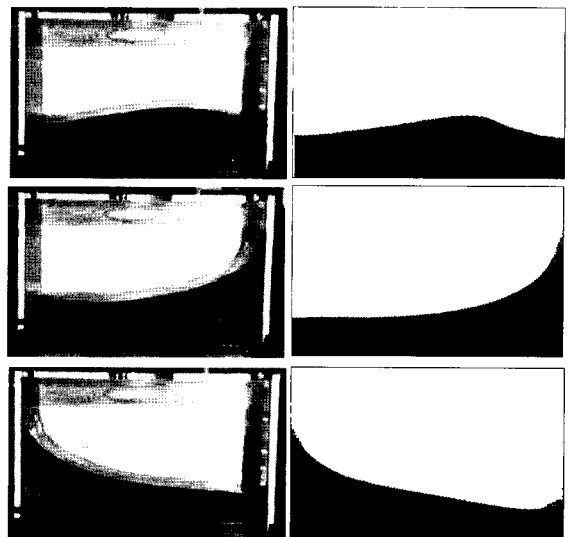


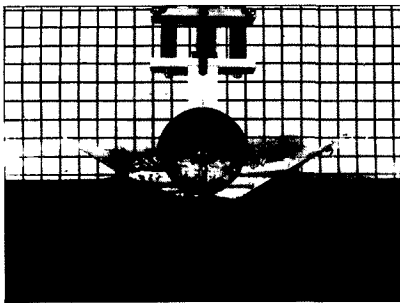
Fig. 4 Experiment vs. numerical analysis

3.3 입수충격 문제

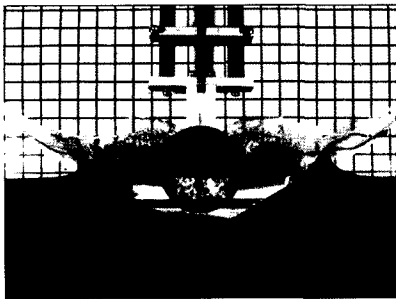
Fig. 5 는 30 도의 기울기를 갖는 웨지 형상의 물체가 일정한 높이에서 낙하하여 자유표면과 충돌하는 현상을 나타낸다. 검은색 점으로 표현된 형상은 SPH 를 이용하여 계산한 결과이다. 해석 결과는 실험으로부터 측정된 자유수면의 형상을 대체로 잘 쫓아 가는 경향을 나타내고는 있으나, 세부적인 형상에는 약간의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 하지만, 여타의 격자기반 기법에서는 모사하기 힘든, 입수초기에 발생하는 순간적인 제트의 거동이 재현되고 있음을 확인할 수 있다. 좀 더 많은 입자를 이용한 해석을 수행한다면 충격시에 발생하는 유동을 보다 정확히 모사할 수 있을 것으로 여겨진다.

3.4 조파기 문제

본 조파기 문제에서는 4m 길이의 사각탱크의 왼쪽 끝단에 피스톤 형상의 가상의 조파기가 특정한 주파수로 움직임을 가지고 그에 따라 탱크내에 유동이 발생하게 된다. 조파기의 움직임은 사인파의



(a) $t=1.681e-2$ sec



(b) $t=2.521e-2$ sec

Fig. 5 Wedge water entry problem

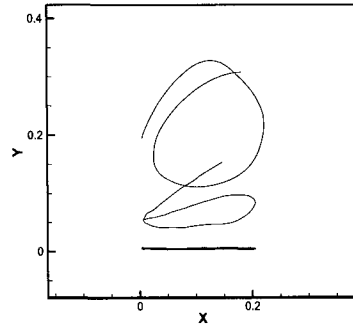


Fig. 6 Orbital motion of fluid particle

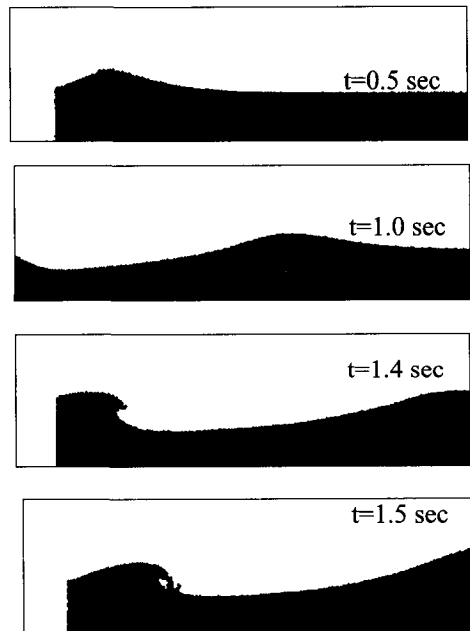


Fig. 7 Wave making problem

형태를 띠며 움직임의 크기는 0.1m, 주파수는 2 이다.

Fig. 6 은 파가 전진하면서 발생하는 입자들의 궤적을 나타낸 그림이다. 수면에 가까이 위치할 입자의 경우 원형의 궤적을 그리면 운동함을 확인할 수 있으며, 바닥면에 가까워 질수록 타원의 형상에 접근하고 최종적으로는 수평방향의 움직임만을 가지게 된다. 이는 선형 포텐셜이론에서 얻어지는 유체입자의 운동과 일치하는 경향이다.

Fig. 7 은 2 차원 조파 문제에 대한 시간별 자유 표면의 형상을 나타낸다. 시간이 지남에 따라 생

성된 파의 파고가 높아지고 파는 더 이상 그 형상을 유지하지 못하고 쇠파하게 된다.

4. 민감도 해석

SPH 해석에 영향을 미치는 해석 인자들에 대한 효과를 알아보기 위하여 Fig.1 에 보인 바와 같은 2 차원 댐붕괴 문제에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 해석 대상으로 선정한 댐붕괴 문제에서는 넓이 3.22m 크기의 탱크 내에 높이 0.6m 폭 1.2m 크기의 유체가 초기에 정지 상태에 놓여 있다가 순간적으로 무너져 내리게 된다.

4.1 입자 수

먼저 2 차원 댐붕괴 문제에 대하여 입자수의 효과를 살펴보았다. 해석에 사용된 입자의 개수를 점차로 늘려가면서 수치해의 변화양상과 기타 물리량의 변화를 정경하였다.

Fig. 8 은 입자의 개수를 800 개에서 최대 20,000 개까지 변화시켜 가면서 해석결과를 도시한 그림이다. 실선으로 표시된 선은 20,000 개의 입자를 사용하여 해석한 결과로부터 추출된 자유 표면의 형상을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 입자의 개수가 증가함에 따라 유동현상은 특정한 패턴으로 수렴해 나갈 수 있고, 5,000 개의 입자를 사용하였을 경우 더 이상의 입자수 증가에 둔감해 짐을 확인할 수 있다.

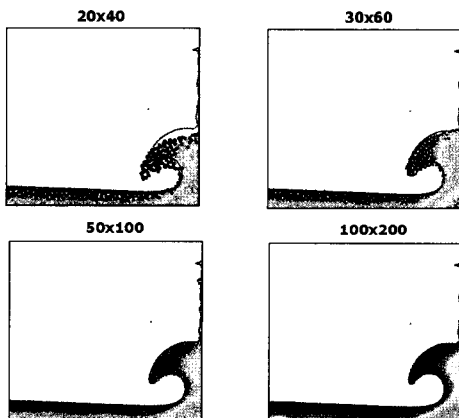
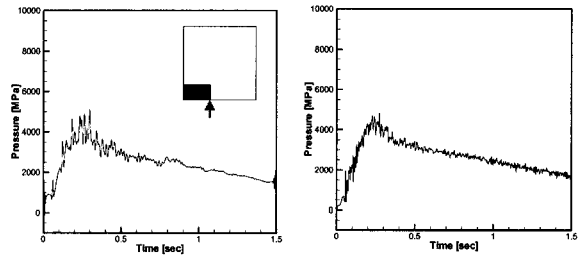


Fig. 8 Free surface profile (t=1.4sec)



(a) 800 particles (b) 20,000 particles

Fig. 9 Pressure time history

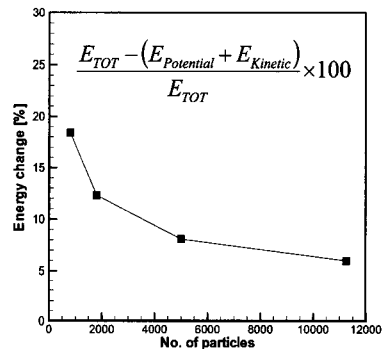


Fig. 10 Energy conservation

Fig. 9 는 입자수 증가에 따른 탱크 바닥에서의 압력의 시간이력을 나타낸다. 입자의 수가 800 개에서 20,000 개로 증가하면서 압력이력 곡선에서 발생하는 불규칙한 진동이 점차로 감소해 나갈 수 있다.

압력값의 진동은 외연적 적분법을 사용하는 본 해석 기법에서 나타나는 현상으로 약한 압축성 (weakly compressible) 가정에 기인한다.

Fig. 10 은 입자수 증가에 따른 계 전체의 에너지 변화를 나타낸다. 입자수가 증가함에 따라 운동 및 위치에너지 이외의 항으로 변환되는 에너지의 양이 감소해 나갈 수 있는데, 이는 입자수가 증가함에 따라 계전체의 에너지가 더 잘 보존됨을 의미한다. 본 해석에서 발생하는 에너지 손실은 압축성유체의 충격파를 수치적으로 다루기 위한 가상적인 점성에 의해 소산되는 에너지와 압축성유동에 의한 내부에너지로 정의된다.

4.2 상대방정식 계수 (음속)

앞서 설명된 바와 같이 본 해석 기법은 유체가 압축성이라는 가정을 기반으로 하고 있다. 이는 식(6)에 정의된 상태방정식을 이용하여 밀도로부터 압력을 외연적으로 얻어냄으로 인해 압력-포아송 방정식을 풀어 준내연적으로 문제를 풀어나가는 방법에 비해 수치적 연산에 대한 부담이 적어진다. 그러나, 상태방정식에 적용되는 계수값에 대한 적절한 설정이 추가적으로 요구된다. 해석에 적용되는 음속은 일반적으로 마하수가 0.1 이하가 되도록 하는 것이 보통이다.

Fig. 11 은 상태방정식에 사용되는 음속이 입자들의 상호거동에 미치는 영향을 도식적으로 설명하고 있다. 입자들이 균일하게 배치되어 있는 초기상태에서는 밀도의 구배가 0 이 되고, 그에 따라 압력의 구배 및 입자에 작용하는 힘이 0 이 된다. 일단 입자가 가속을 받아 움직임을 가지게 되면 입자간의 간격이 좁아지고 그에 따라 밀도 및 압력의 구배가 발생하여 최종적으로 입자들간의 척력을 유발하게 된다. 입자의 이동으로 인해 입자간에 발생하는 힘은 해당 유체의 음속의 제곱에 비례하므로 음속이 클수록 같은 거리를 이동한 입자간에 발생하는 척력은 커지게 된다. 마찬가지로 원리가 입자간의 간격이 멀어지는 경우에도 적용이 될 수 있으며, 결론적으로 유체의 음속이 클수록 멀어지는 입자간에 작용하는 인력의 크기도 커짐을 알 수 있다. 이는 격렬한 유동에 의해 입자가 흩어지는 현상과 밀접한 관련이 있는데, 상기

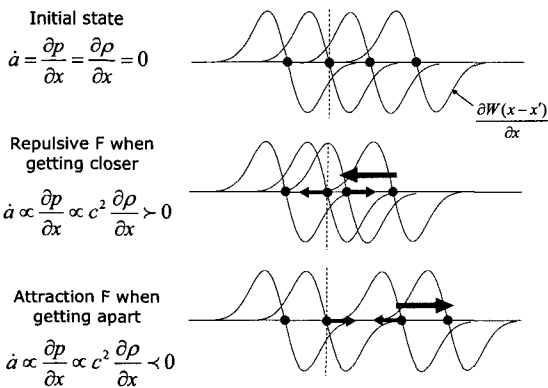


Fig. 11 Role of speed of sound

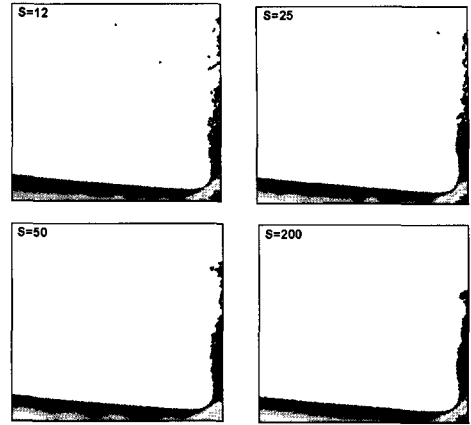
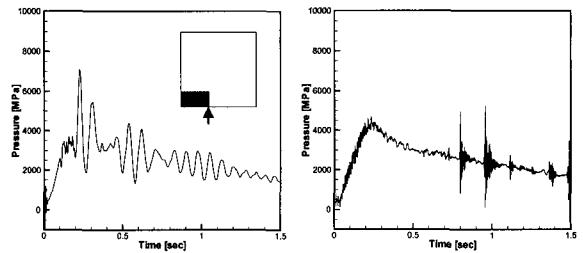


Fig. 12 Particle scattering



(a) c=12 m/sec (b) c=200 m/sec

Fig. 13 Pressure time history

의 이유로 인해 더 큰 음속을 가지는 유체의 경우에 입자의 흩어짐이 덜 발생할 것임을 쉽게 유추해 볼 수 있다.

Fig. 12 는 댐붕고 문제에서 발생하는 입자의 흩어짐의 정도를 음속의 변화에 따라 관찰한 결과이다. 음속이 커질수록 입자들간이 흩어짐 현상이 줄어들음을 확인할 수 있다.

Fig. 13 은 음속에 따른 탱크 바닥에서의 압력인력을 나타낸다. 음속이 작은 경우 낮은 주파수의 떨림현상이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 음속이 큰 경우에는 상대적으로 높은 주파수의 떨림현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

앞서 언급된 대로 압력의 불규칙한 진동은 압축성 가정으로 인한 입자들의 떨림에 기인하며 음속을 높게 책정할수록 점점 더 비압축성의 성질에 접근하게 된다. 물과 같은 비압축성 유체의 거동을 모사하기 위해서는 음속의 실제값(1500m/sec)

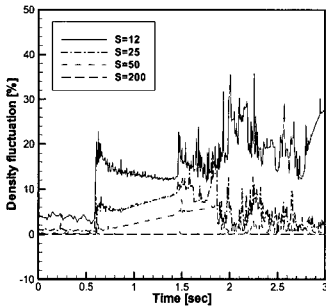


Fig. 14 Density fluctuation

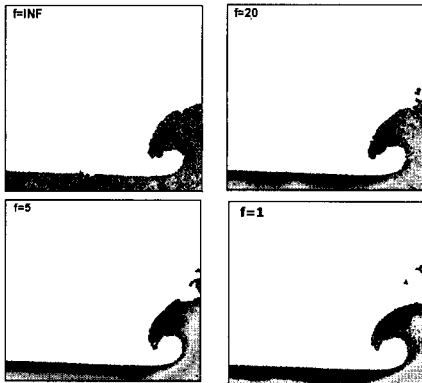


Fig. 15 Pressure field (t=1.4sec)

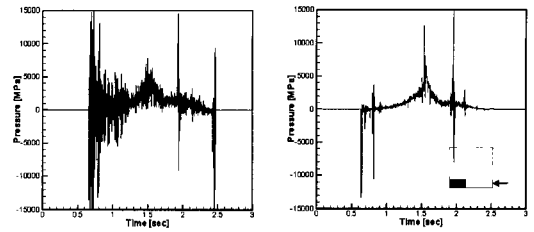


Fig. 16 Pressure time history

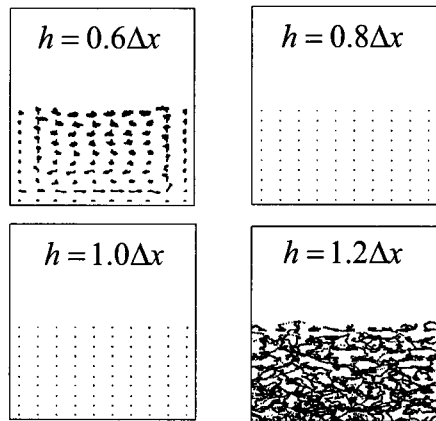


Fig. 17 Effect of smoothing length

을 부가하여야하나 이는 비현실적으로 작은 시간 증분으로 이어지기도 하며, 실제로 자유표면이 있는 경우에는 계산의 비효율성을 증가시키는 결과를 낳게 된다.

Fig. 14 는 해석이 진행되는 동안 유동장내에서 발생하는 밀도변화의 시간이력을 표현한 그림이다. 음속이 상대적으로 작은 경우에는 밀도의 변화가 최대 30%까지 발생하게 되는데 이는 비압축성의 특성을 제대로 반영하지 못하는 경우가 된다. 반대로 음속이 커지면서 밀도의 변화량이 상대적으로 줄어드는 것을 알 수 있으며, 음속이 200m/sec 에 다다른 경우 밀도의 변화가 거의 발생하지 않아 비압축성의 성질이 회복됨을 보이고 있다.

4.3 밀도 재설정간격

식(3)에 의해 매 시간간격마다 계산되는 밀도는 주기적으로 식(11)에 따라 재설정된다.

밀도의 재설정은 압력장을 부드럽게 만들어 줄 뿐만 아니라 가상점성에 의해 소산되는 에너지의 양을 줄여주는 긍정적인 효과가 있다.

Fig. 15 는 밀도 재설정의 간격에 따라 압력장이 부드러워지는 정도를 나타낸다. 밀도 재설정을 하지 않은 경우부터 매 20, 5, 1 의 시간간격마다 밀도 재설정을 하는 경우, Fig.15 에 보인 바와 같이 압력장의 부드러운 정도가 현격하게 달라짐을 확인할 수 있다.

Fig. 16 은 밀도 재설정에 따른 압력의 시간이력을 나타낸다. 기대되는 바와 같이 밀도 재설정의 간격을 20 에서 1 로 줄임으로 인해 압력의 시간 이력에서 발생하는 불규칙한 신호가 상당부분 사라짐을 확인할 수 있다.

4.4 완화거리

Fig. 17 은 2 차원 사각용기 속의 정적 상태의 유체에 대한 수치 실험을 보여준다.

중력 외에 아무런 외력이 가해지지 않았지만 식 (7)로부터 주어진 밀도의 분포가 완벽히 정압력을 형성하지 못하여 수치적으로 작은 가속도를 유발하게 된다. 이 때, 완화거리가 너무 짧거나 길면 수치적 불안정성을 보이며 움직임을 더 키워나가게 된다. 결국 완화거리의 크기가 수치 시뮬레이션의 안정성과 밀접한 관계에 있음을 알 수 있다.

Fig. 17의 결과에 따르면 완화거리(h)는 초기 입자들의 간격(Δx)의 0.8~1.0 배로 결정하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다.

5. 결론

상기의 수치해석결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- SPH 기법에 대한 수치해석 코드를 개발하였으며, 2 차원 댐붕괴 및 슬로싱 실험결과와 비교하여 그 유효성을 검증하였다.
- 댐붕괴 문제에 대하여 입자의 개수를 늘려나감에 따라 해석 결과로 얻어지는 자유수면의 형상은 특정한 패턴으로 수렴해 나감을 확인하였다.
- 상태방정식 계수와 관련된 유체의 음속은 입자들의 흠어짐 현상과 밀접한 관련을 가지고 있음을 밝혀내었다. 해석에서 나타나는 입자의 흠어짐은 일정부분 수치해석의 효율성을 위해 인위적으로 낮게 책정된 음속으로 인해 야기된다.
- 주기적인 밀도재설정을 수행함으로 인해 압력장에 나타나는 고주파수의 진동성분을 상당부분 제거할 수 있음이 확인되었다. 밀도의 재설정은 입자 당 질량, 체적, 밀도간의 관계를 정확히 회복해줌으로 인해 해의 정도를 향상시킬 수 있으며, 가상점성에 의해 소산되는 에너지의 양도 줄일 수 있는 장점이 있다.
- 완화거리는 수치해의 안정성과 밀접한 관련이 있으며 너무 작거나 크게 설정하는 경우 해의 정도가 떨어지는 결과로 이어진다. 일반적으로 2 차원 문제의 경우 20~23 개 정도의 입자가 함수의 내삽에 사용되는 것이 바람직하다.
- 입수충격 문제 및 조파문제를 SPH 기법을 이용하여 수치시뮬레이션 하였으며, 두 경우 모두 물리적으로 타당한 결과를 중을 확인하였다. 특히 입수충격 문제의 자유표면의 형상을 재현하는데에 매우 효율적인 기법이 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Bachelor, G.K., 1967, An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, Cambridge
- Colagrossi, A. and Landrini, M., 2003, "Numerical Simulation of Interfacial Flows by Smoothed Particle Hydrodynamics," Journal of Computational Physics, Vol. 191, pp. 448-475.
- Liu, G.R. and Liu, M.B., 2003, Smoothed Particle Hydrodynamics -A Meshfree Particle Method-, World Scientific Publishing Co. Ltd.
- Monaghan, J.J., 1994, "Simulating Free Surface Flows with SPH," Journal of Computational Physics, Vol. 110, pp. 399-406.
- Monaghan, J.J., 2000 "SPH without a Tensile Instability," Journal of Computational Physics, 159, pp. 290-311.
- Oger, G., Doring, M., Alessandrini, B. and Ferrant, P., 2005, "Two-dimensional SPH Simulations of Wedge Water Entries," Journal of Computational Physics, Vol. 213, pp. 803-822.
- Iglesias, S.A., Perez Rojas, L., and Zamora Rodriguez, R., 2004, "Simulation of Anti-roll Tanks and Sloshing Type Problems with Smoothed Particle Hydrodynamics," Ocean Engineering, Vol. 31, pp. 1169-1192.
- Swegel, J.W., Hicks, D.L. and Attaway, S.W., 1995. "Smoothed Particle Hydrodynamics Stability Analysis," Journal of Computational Physics, Vol. 116, pp. 123-134.



< 김 유 일 >



< 남 보 우 >



< 김 용 환 >