

SMAC법을 이용한 물기둥 붕괴의 가시화

Visualization of the Water Column Collapse by using SMAC Method

김 남 형* / 김 남 국**

Kim, Nam Hyeong / Kim, Nam Guk

Abstract

SMAC method, one of the numerical simulation techniques, is modified from the original MAC method for the time-dependent variation of fluid flows. The Navier-Stokes equations for incompressible time-dependent viscous flow is applied, and marker particles which present the visualization of fluid flows are used. In this study, two-dimensional numerical simulations of the water column collapse are carried out by SMAC method, and the simulation results are compared with Martin and Moyce's experimental data and result of the MPS method. A good results are obtained. This numerical simulation could also be applied to the breaking phenomenon of hydraulic structures such as dam break.

keywords : SMAC method, Marker particles, Water column collapse, Visualization

요 지

수치시뮬레이션 기법 중 하나인 SMAC법은 시간의 변화에 따른 유동의 현상을 해석하기 위해 MAC법을 수정한 기법이다. 비압축 점성 흐름을 풀기 위해 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며, 유동을 가시화하기 위해 마커입자가 사용되었다. 본 연구에서는 SMAC법을 사용한 2차원 물기둥 붕괴현상의 수치시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과는 Martin과 Moyce의 실험 결과 및 MPS법의 계산결과와 비교하였고, 좋은 결과가 얻어졌다. 또한, 이 수치시뮬레이션은 댐 붕괴와 같은 수공구조물의 붕괴현상에 적용할 수 있겠다.

핵심용어 : SMAC법, 마커입자, 물기둥 붕괴, 가시화

* 제주대학교 해양토목공학과 부교수
Associate Prof., Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
(E-mail: nhkim@cheju.cheju.ac.kr)

** 제주대학교 토목해양공학과 석사과정
Graduate Student, Department of Civil & Ocean Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

1. 서론

유체의 유동현상을 기술하는 경우에 유체는 압축성을 무시할 수 있고, 이와같이 비압축성의 유체흐름을 기술하는 기초방정식으로는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이 있다. 이 Navier-Stokes 방정식을 직접 푸는 계산기법중에서, 자유표면을 갖는 2차원 비압축성 유체를 해석하기 위하여 개발된 MAC법이 있다(Harlow와 Welch, 1965; Welch 등, 1966; Hirt와 Harlow, 1967; Hirt, 1968). MAC법은 대상으로 하는 계산영역을 몇 종류의 셀로 구분하고 그 특성에 따라 몇개의 Marker를 배치하여 유체의 형상을 나타내도록 하는 것이다. 이 입자는 중량을 가지고 있지 않은 이상화된 입자로서 유체의 형상을 나타내기 때문에 MAC법(Marker And Cell)으로 불려진다. 이 Marker는 속도장·압력장 등의 계산에는 직접 관여하고 있지는 않지만, 계산결과의 시각화·흐름의 가시화에 중요한 역할을 한다. MAC법이 발표된 이후에 많은 수정을 거쳐 계산 시간을 현저하게 단축시킬수 있도록 scheme을 개량한 SMAC법(Simplified Marker And Cell)이 제안 되었다(Amsden과 Harlow, 1970; Hirt 등, 1974). MAC 및 SMAC계열의 수치해석법은 유체의 표면형상이 시간과 더불어 연속적으로 변화하는 문제의 해석에 유용한 방법으로서 SMAC법을 이용하여 몇 가지 수치시뮬레이션이 수행된 바 있다(김남형과 김남국, 2000).

본 연구에서는 SMAC법을 이용한 연직 물기둥의 붕괴현상을 예로 들어 수치시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 가시화하였으며, Martin과 Moyce(1952)의 실험 결과 및 Koshizuka와 Oka(1996)가 MPS(Moving-Particle Semi-implicit)법으로 수치시뮬레이션한 계산결과와의 비교를 통하여 수치시뮬레이션의 타당성을 검토하였다.

2. 기본방정식

2차원 직교좌표계에서의 비압축성인 흐름을 해석하기 위한 기본방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로 다음과 같다.

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \quad (3)$$

여기서 u, v 는 x, y 방향의 속도성분, p 는 압력, ρ 는 밀도, ν 는 동점성계수, F_x, F_y 는 x, y 방향에 작용하는 단위질량당의 외력을 나타내며, 본 연구에서는 편의상 x 방향은 수평방향, y 방향은 연직방향을 나타낸다. 식 (1)을 이용하여, 식 (2)와 (3)을 약간 변형하면,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) + F_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \nu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) + F_y \quad (5)$$

으로 된다.

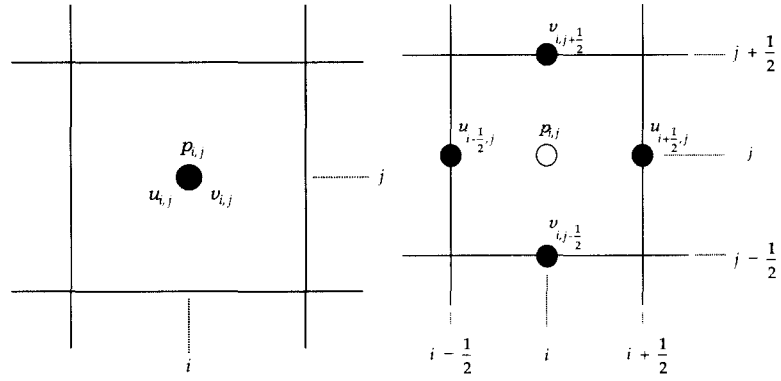
본 연구에서는 식 (1), (4), (5)를 기본방정식으로 사용하여 수치시뮬레이션을 수행한다.

3. 기본방정식의 이산화

편미분형태의 기초방정식을 차분하기 위해서는 엇갈린 격자망(staggered mesh)을 사용한다. 일반적으로 쓰이는 격자망에서는 속도와 압력을 격자의 중앙에서 정의하지만 엇갈린 격자망의 경우, 속도는 격자의 중심에서, 압력은 격자의 중앙에서 정의한다. 엇갈린 격자망을 사용하는 이유는 일반적인 격자망에서와 같이 속도, 압력을 동일점에서 정의하는 경우에 수치해석의 부정확성과 불안정성을 초래할 수 있기 때문이다. 일반적인 격자망과 엇갈린 격자망에서 각 변수들의 정의는 그림 1에 나타냈다.

식 (1)과 식 (4)-(5)에서 시간은 전진차분, 공간은 중심차분을 이용하면, 다음과 같은 차분방정식이 얻어진다. 단, 이송항의 차분에서는 Donor-Cell법을 이용한다.

$$D_{i,j}^{n+1} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta y} = 0 \quad (6)$$



(a) 일반적인 격자망에서의 변수 배치

(b) 엇갈린 격자망에서의 변수 배치

그림 1. 일반적인 격자망과 엇갈린 격자망에서의 변수배치

$$\tilde{u}_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = u_{i+\frac{1}{2},j}^n + \delta t \left(\frac{\theta_{i,j} - \theta_{i+1,j}}{\delta x} - COUX - COUY + VISX + F_x \right) \quad (7)$$

$$\tilde{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \delta t \left(\frac{\theta_{i,j} - \theta_{i,j+1}}{\delta y} - COVX - COVY + VISY + F_y \right) \quad (8)$$

여기서, $COUX$, $COUY$ 와 $COVX$, $COVY$ 는 각각 x , y 방향의 이송항(convective term)을 나타내고, $VISX$, $VISY$ 는 각각 x , y 방향의 점성항(viscous term)을 나타내며 다음과 같다.

$$COUX = \frac{1}{4\delta x} \left\{ \left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{3}{2},j}^n \right)^2 + \left| u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{3}{2},j}^n \right| \left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - u_{i+\frac{3}{2},j}^n \right) - \left(u_{i-\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)^2 - \left| u_{i-\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \left(u_{i-\frac{1}{2},j}^n - u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) \right\} \quad (9)$$

$$COUY = \frac{1}{4\delta y} \left\{ \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n \right) \left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n \right) + \left| v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n \right| \left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n \right) - \left(v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n \right) \left(u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n + u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) - \left| v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n \right| \left(u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n - u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) \right\} \quad (10)$$

$$COVX = \frac{1}{4\delta x} \left\{ \left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n \right) \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n \right) + \left| u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n \right| \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n \right) - \left(u_{i-\frac{1}{2},j}^n + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^n \right) \left(v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) - \left| u_{i-\frac{1}{2},j}^n + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^n \right| \left(v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) \right\} \quad (11)$$

$$COVY = \frac{1}{4\delta y} \left\{ \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{3}{2}}^n \right)^2 + \left| v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{3}{2}}^n \right| \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i,j+\frac{3}{2}}^n \right) \right. \\ \left. - \left(v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right)^2 - \left| v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right| \left(v_{i,j-\frac{1}{2}}^n - v_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) \right\} \quad (12)$$

$$VISX = \nu \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n + u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^n}{\delta y^2} \right. \\ \left. - \frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n - v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\delta x \delta y} \right) \quad (13)$$

$$VISY = -\nu \frac{1}{\delta x} \left\{ \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - u_{i+\frac{1}{2},j}^n}{\delta y} - \frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\delta x} \right) \right. \\ \left. - \left(\frac{u_{i-\frac{1}{2},j+1}^n - u_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\delta y} - \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n}{\delta x} \right) \right\} \quad (14)$$

또한, 그림 1에 나타난 엇갈린 격자망에는 다음과 같은 근사식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} &= \frac{u_{i+\frac{1}{2},j} + u_{i+\frac{1}{2},j+1}}{2}, & u_{i,j} &= \frac{u_{i-\frac{1}{2},j} + u_{i+\frac{1}{2},j}}{2} \\ v_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} &= \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}}{2}, & v_{i,j} &= \frac{v_{i,j-\frac{1}{2}} + v_{i,j+\frac{1}{2}}}{2} \\ (u \cdot v)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} &= u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \cdot v_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

또, 윗첨자 $n+1$ 은 새로운 시간 $t=(n+1)\Delta t$ 의 유속값을 나타내며, 식 (7)과 식 (8)에 있어서 유속 u^{n+1}, v^{n+1} 에 ~기호가 붙어 있는 것은 시간의 전진차분에 의해 시간 $(n+1)$ 의 값이 구해지는 것으로, 각각의 u, v 는 식 (6)을 만족하고 있지 않기 때문에, “임시유속”의 의미이다. 식 (6)을 만족하기 위한 반복계산은 포텐셜 함수 ϕ 를 이용하는데, 그 이유는 포텐셜함수 ϕ 가 모든 경계에서 균일한 경계조건(homogeneous boundary condition)을 가지며 속도의 반복 보정시 압력을 직접 사용하는 것보다 수렴이 빠르기 때문이다. 포텐셜함수 ϕ 를 이용한 2차원 속도보정식은 다음과 같다.

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = \tilde{u}_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - \frac{\phi_{i+1,i} - \phi_{i,i}}{\delta x}, \quad v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = \tilde{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,i}}{\delta y} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 식 (6)을 차분하면, 다음식이 구해진다.

$$D_{i,j}^{n+1} = \tilde{D}_{i,j} - \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{\delta x^2} - \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{\delta y^2} \quad (17)$$

$$\phi_{i,j}^{k+1} = \frac{1+\alpha}{\left(\frac{2}{\delta x^2} + \frac{2}{\delta y^2}\right)} \left[-\tilde{D}_{i,j} + \frac{\phi_{i+1,j}^k + \phi_{i-1,j}^{k+1}}{\delta x^2} + \frac{\phi_{i,j+1}^k + \phi_{i,j-1}^{k+1}}{\delta y^2} \right] - \alpha\phi_{i,j}^k \quad (18)$$

여기서, 변수 ϕ 의 기호 k 는 반복계산에 의한 ϕ 의 수렴값으로 반복계산 횟수를 나타내고 있다. 변수 α 는 완화계수로서 다음의 범위 ($0 \leq \alpha < 1$) 값을 사용해야 하며, 본 계산에서 α 는 0.7로 했다. 반복계산할 때에 수렴기준은 다음식을 사용한다.

$$\left| \frac{|\phi_{i,j}^{k+1}| - |\phi_{i,j}^k|}{|\phi_{i,j}^{k+1}| + |\phi_{i,j}^k|} \right| < \varepsilon \quad (19)$$

여기서 ε 은 0.0002로 했다.

4. 계산영역의 분류 및 경계조건

본 연구에서는 그림 2에서 나타내듯이 4종류의 cell로 나누어 수치시뮬레이션을 수행하였다.

- ① empty cell(빈 공간의 셀, E) : 입자를 포함하지 않은 셀, 즉 유체가 존재하지 않는 영역
- ② surface cell(표면셀, S) : 입자를 포함하면서 주위에 1개 이상의 빈 셀과 이웃하는 셀
- ③ full cell(유체의 셀, F) : 입자를 포함하면서 주위에 빈 셀과 이웃하지 않는 셀, 즉 유체로만 채워진 영역
- ④ boundary cell(경계의 셀, B) : 해석영역을 둘러싸는 경계의 셀

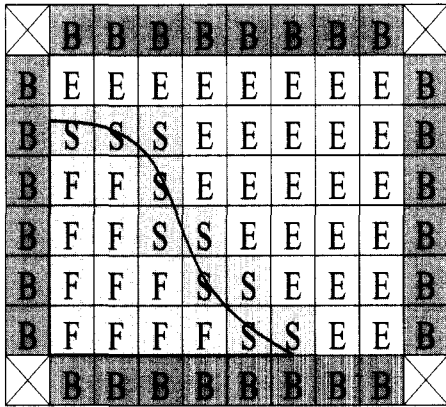


그림 2. 계산 영역의 분류

해석하는 유체의 좌우상하 벽면에 있어서 경계조건은 slip조건을 사용했다. slip조건은 벽면에 마찰력이 작용하지 않는 것을 의미한다. 그림 3의 기호를 이용하여 경계조건을 나타내면,

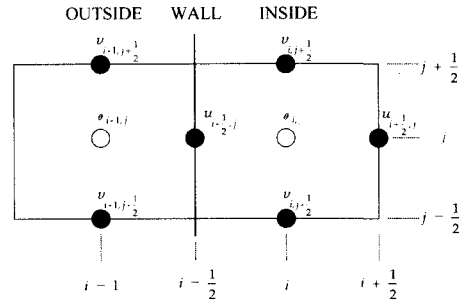


그림 3. 경계벽에서의 변수 배치

$$\left. \begin{aligned} u_{i-\frac{1}{2},j}^n &= 0 & \phi_{i-1,j} &= \phi_{i,j} \\ v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n &= v_{i,j+\frac{1}{2}}^n & v_{i-1,j-\frac{1}{2}}^n &= v_{i,j-\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

으로 된다.

또, 자유수면의 경계조건은 입자의 운동의 궤적에서 Scell을 식별하며, 점선응력의 조건은 다음식으로 주어진다.

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

식 (21)에서 $u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n$ 은 다음식의 이산형을 취한다.

$$u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n = u_{i+\frac{1}{2},j}^n - \frac{\delta y}{\delta x} (v_{i+1,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j+\frac{1}{2}}) \quad (22)$$

식 (22)를 점성항에 대입하면, 점성항은 소거된다. 점선응력의 조건은 다음과 같다.

$$p_{i,j}^n = p_{i,j}^n(\text{외부압력}) + \frac{2\nu}{\delta y} (v_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}}) \quad (23)$$

5. 해석결과 및 고찰

계산의 수순을 그림 4에 나타낸다. 먼저, 초기계산영역에 있어서 \tilde{u}, \tilde{v} 을 구하고, 질량보존 $D=0$ 을 만족하는 u, v 을 결정하며, 마지막 단계에서 이들을 이용

하여 marker를 이동시켜, 계산영역을 재설정한다. 이러한 과정을 반복하는 것에 의해 각 시각에서의 속도, 압력을 구하며 연속적으로 marker를 화면에 출력시킴으로써 애니메이션 효과를 얻는 것이다.

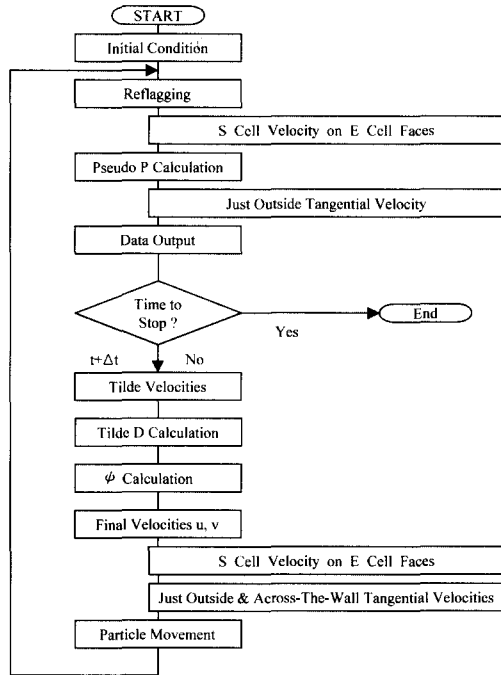


그림 4. SMAC법의 계산 순서

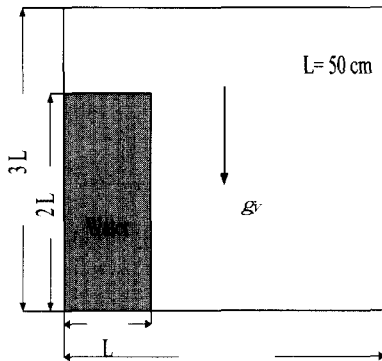


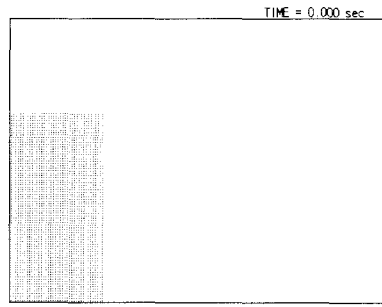
그림 5. 계산 영역의 크기

직사각형 수조에서 물기둥 붕괴현상을 가시화하기 위해 사용된 해석 영역의 크기를 그림 5에 나타낸다. x방향으로 40cell, y방향으로 30cell로 하였고 각 cell의 크기는 5cm로 하였고 때문에 전체 영역은 200cm×

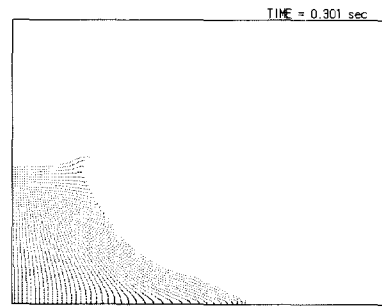
150cm이다. 초기 물기둥의 영역은 Martin과 Moyce, Koshizuka와 Oka가 수행한 연구와 같이 폭과 높이의 비가 1 : 2가 되도록 50cm×100cm로 했다. 유체의 동점성계수는 $\nu = 0.01\text{cm}^2/\text{sec}$, 경계벽의 조건은 마찰이 없는 slip조건으로 하였으며, 중력가속도는 $g_y = 980\text{cm}/\text{sec}^2$ 이다.

해석결과와 marker분포와 속도벡터(velocity vector)의 분포를 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 그림 6(a), 그림 7(a)는 처음에 정지하고 있는 물기둥의 형상을 보여주며, 그림 6(b)~(l), 그림 7(b)~(l)은 중력가속도에 의해 쏟아져 내린 물이 시간의 진행에 따라 움직이는 형상을 marker와 속도 벡터로서 보여 주고 있다. 그림 7(b)~(c)의 속도벡터 분포를 살펴보면 쏟아져 내린 물이 유속이 증가하면서 해석영역의 오른쪽으로 퍼져나가고 있음을 알 수 있으며, 이것은 댐 붕괴 시 쏟아져 내리는 물의 유동 형상을 해석하는 것과 유사하다고 볼 수 있겠다. 그림 6(d)에서는 쏟아져 내린 물이 수조의 오른쪽 벽에 부딪친 후 위쪽으로 쳐올라가는 형상을 관찰할 수 있으며, 그림 6(e), 그림 7(e)에서는 처음의 물기둥 높이 정도로 쳐올라간 물이 연직 방향 속도가 점점 감소하다가 중력가속도의 영향으로 다시 내려오기 시작하는 형상이 관찰된다. 그림 7(e)와 그림 7(f)를 비교하여 보면 오른쪽 벽에서 내려오기 시작한 물의 속도가 다시 증가하면서 표면 부근의 물이 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 그림 7(f)의 오른쪽과 그림 7(h)의 왼쪽 부근에서는 와류가 형성되는 것도 관찰된다. 그림 6(g)~(l)을 종합적으로 보면, 그림 6(d)와 그림 6(g)에서 관찰된 것처럼 동일한 과정이 반복되고 있으나 시간이 지남에 따라 유속이 점점 감소하여 물기둥 붕괴 후 25초정도 지나면 수면이 잔잔해지는 것을 관찰할 수 있다. marker분포와 속도벡터의 분포는 자유표면의 변화를 잘 표현하고 있으며, 이것은 물기둥 붕괴후 연직 수조안에서 발생할 수 있는 sloshing 현상을 잘 나타내고 있다고 여겨진다.

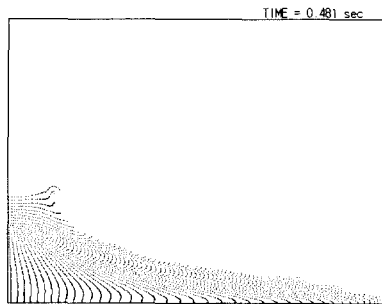
그림 8은 SMAC법을 이용한 수치시물레이션의 타당성을 검증하기 위하여, 본 연구의 가시화 결과를 Martin과 Moyce의 실험결과 및 Koshizuka와 Oka의 MPS법 계산결과와 비교하여 도표로 나타낸 것이다. Martin과 Moyce는 실험시 물기둥의 폭은 2.25inch, 1.125inch로 하였고 물기둥의 높이는 폭의 2배를 사용하였다. 그림 8의 가로축은 무차원시간, 세로축은 처음의 물기둥 폭과 물기둥 붕괴시 시간의 진행에 따라 선단이 퍼져 나간 거리와의 비이다. 그림 8의 결과로부터



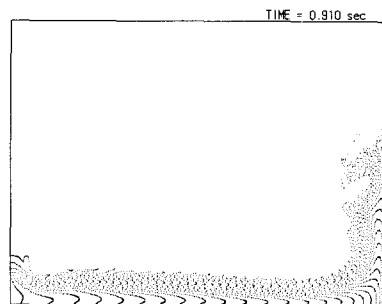
(a) $t = 0.000$ sec



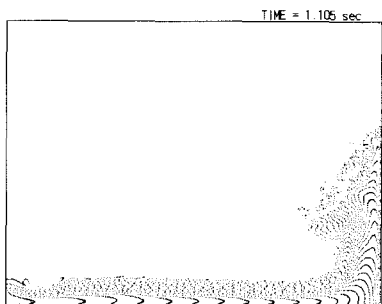
(b) $t = 0.301$ sec



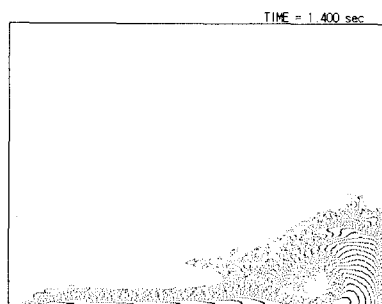
(c) $t = 0.481$ sec



(d) $t = 0.910$ sec

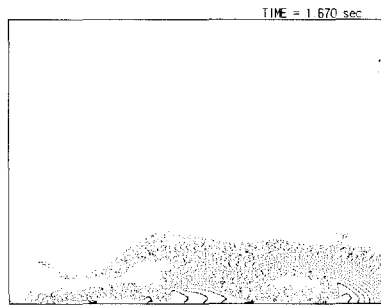


(e) $t = 1.105$ sec

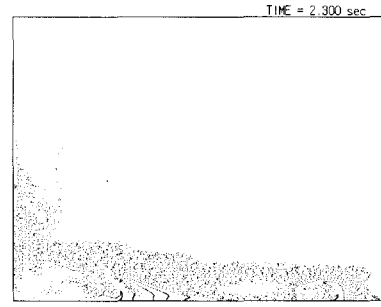


(f) $t = 1.400$ sec

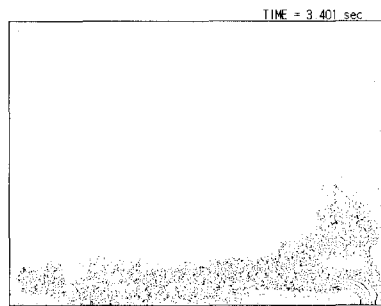
그림 6. marker분포를 이용한 가시화 결과[(a)-(f)] (1)



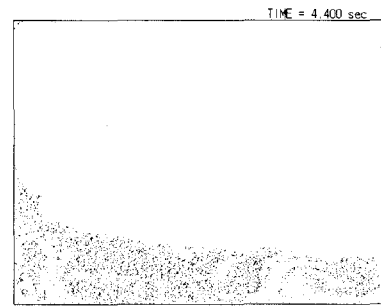
(g) $t = 1.670$ sec



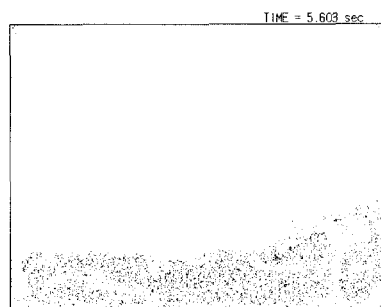
(h) $t = 2.300$ sec



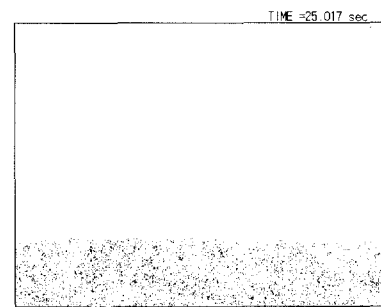
(i) $t = 3.401$ sec



(j) $t = 4.400$ sec

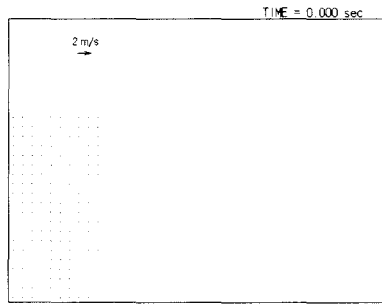


(k) $t = 5.603$ sec

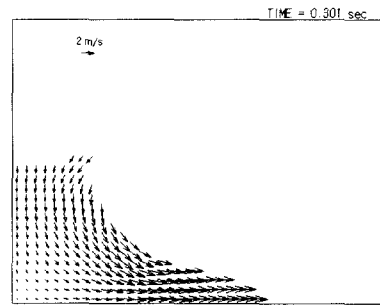


(l) $t = 25.017$ sec

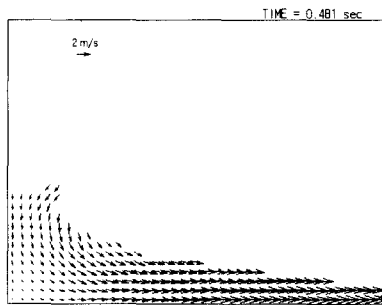
그림 6. marker분포를 이용한 가시화 결과(g)-(l) (2)



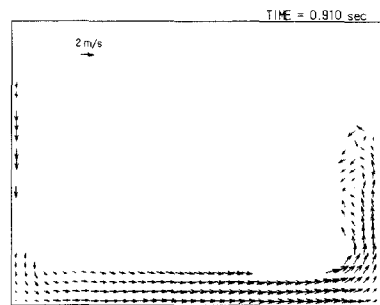
(a) $t = 0.000$ sec



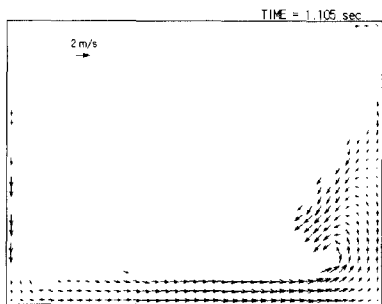
(b) $t = 0.301$ sec



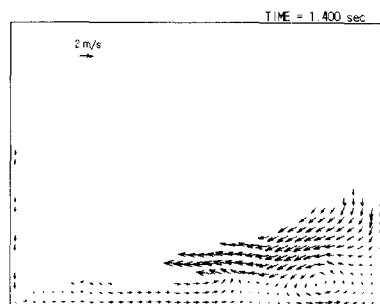
(c) $t = 0.481$ sec



(d) $t = 0.910$ sec

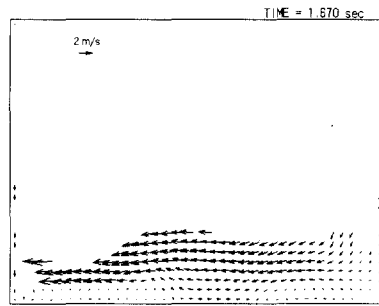


(e) $t = 1.105$ sec

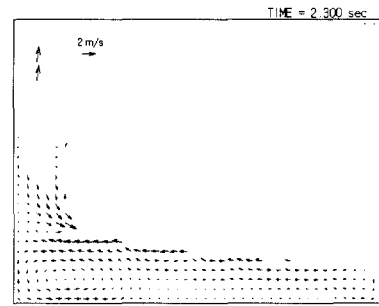


(f) $t = 1.400$ sec

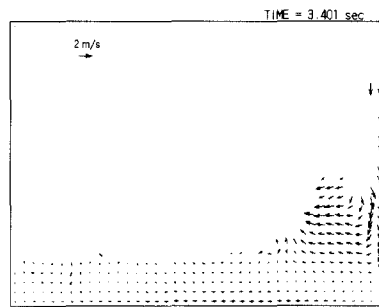
그림 7. 속도벡터 분포를 이용한 가시화 결과(a)-(f)] (1)



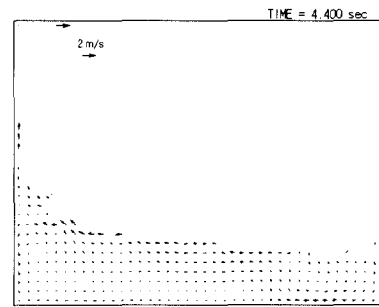
(g) t = 1.670 sec



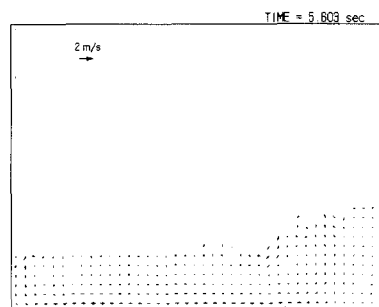
(h) t = 2.300 sec



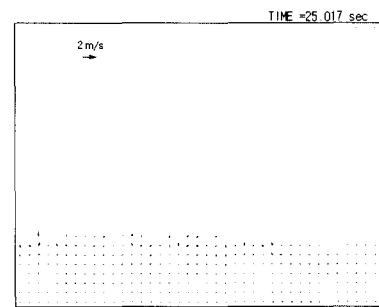
(i) t = 3.401 sec



(j) t = 4.400 sec



(k) t = 5.603 sec



(l) t = 25.017 sec

그림 7. 속도벡터 분포를 이용한 가시화 결과[(g)-(l)] (2)

SMAC법을 사용한 물기둥 붕괴의 수치계산 결과와 MPS법을 사용한 계산결과는 거의 일치함을 알 수 있으며, Martin과 Moyce의 실험결과와는 정성적으로 유사한 물기둥의 붕괴 형상을 나타내고 있다고 사료된다. 또, 제작된 동영상은 제주대학교 해안 및 항만공학 연구실 홈페이지에서 볼 수 있다(<http://coastal.cheju.ac.kr/animation.htm>).

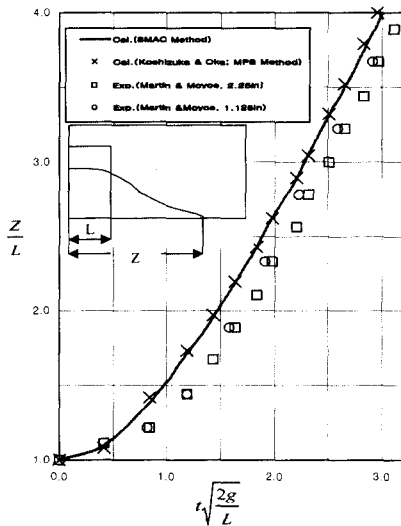


그림 8. 물기둥 붕괴시 선단 이동거리의 비교

6. 결론 및 요약

많은 이공학 분야에서 유체의 유동에 관한 수치시뮬레이션이 활발하게 행하여 지고 있다. 실제로 관찰하기 힘들거나 직접적인 실험을 하기 어려운 자연 현상도 컴퓨터의 발달과 수치시뮬레이션 기법의 발전으로 가능하게 되었고 그 결과를 토대로 자연 현상에 대한 예측도 가능하게 되었다.

본 연구는 SMAC법을 이용하여 물기둥 붕괴의 수치시뮬레이션을 수행하였고, 그 계산결과를 가시화한 것이다. 계산결과는 물기둥의 붕괴 형상을 잘 표현하고 있으며, 수치시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해 Martin과 Moyce의 실험 결과 및 Koshizuka와 Oka의 MPS법 계산결과와 비교하였고, 매우 좋은 결과가 얻어졌다. 따라서, 본 연구에서 수행한 물기둥 붕괴의 수치시뮬레이션은 댐 붕괴와 같이 물이 일시에 쏟아져 내리는 현상을 해석할 수 있으므로 댐을 비롯한 수공구조물의 설계에 유용할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 김남형, 김남국 (2000). "가상수조에서 자유표면을 가진 유체흐름의 가시화시뮬레이션." 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제14권, 제3호, pp.35~40.
- Amsden, A. A. and Harlow, F. H. (1970). *The SMAC method: A numerical technique for calculating incompressible fluid flows*. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Report LA-4370.
- Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface." *Phys. of Fluids*, Vol. 8, No.12, pp. 2182~2189.
- Hirt, C. W. (1968). "Heuristic stability theory for finite difference equations." *Jour. Comp. Phys.*, Vol. 2, pp. 339~355.
- Hirt, C. W., Amsden, A. A. and Cook, J. L. (1974). "An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds." *Jour. Comp. Phys.*, Vol. 14, pp. 227~253.
- Hirt, C. W. and Harlow, F. H. (1967). "A general corrective procedure for the numerical solution of initial value problems." *Jour. Comp. Phys.*, Vol. 2, pp. 114~119.
- Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996). "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid." *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 123, pp. 421~434.
- Martin, J. C. and Moyce, W. J. (1952). "An Experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane." *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, pp. 312~324
- Welch, J. E., Harlow, F. H. and Daly, B. J. (1966). *The MAC method: A computing technique for solving viscous, incompressible, transient fluid flow problems involving free surfaces*. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Report LA-3425

(논문번호:01-046/접수:2001.06.14/심사완료:2001.09.28)