

SMAC법을 이용한 월파현상의 가시화 모의

김남형 · 김남국
제주대학교 해양토목공학과

Visual Modelling of the Overtopping using SMAC Method

NAM-HYEONG KIM AND NAM-GUK KIM

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

KEY WORDS: SMAC method 에스맥법, Marker particles 마커입자, Overtopping 월파, Visualization 가시화

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 are applied, and Also marker particles which present the visualization of fluid flows are used. In this study, two-dimensional numerical simulations of the overtopping are carried out by SMAC method, and the simulation results are visualized. In addition to, motion pictures are made for efficient visualization of the simulation results. This numerical simulation could also be applied to the design of coastal structures as dike and revetment.

1. 서 론

수치유체역학의 분야에서는 연속차원의 문제를 유한차원의 문제로 해석하는 수치기법의 하나인 유한차분법(FDM, finite difference method)이 주로 사용되어 왔다. 그러나 유체와 대기가 접하는 부분, 즉 자유표면의 위치와 형상을 인식하거나, 그 표면에서의 속도 등을 계산하는 문제는 그리 쉬운 문제는 아니다. 유체의 유동현상을 기술하는 경우에 유체는 압축성을 무시 할 수 있고, 이와 같은 비압축성의 유체흐름을 기술하는 기초방정식으로서 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이 있다. 이 Navier-Stokes 방정식을 직접 푸는 계산기법 중에서, 자유표면을 포함하는 2차원 비압축성 유체를 해석하기 위하여 개발된 MAC 법이 있다(Harlow and Welch, 1965; Welch et al, 1966; Hirt and Harlow, 1967; Hirt, 1968). MAC법은 대상으로 하는 계산영역을 5종류의 셀로 구분하고 그 특성에 따라 몇 개의 Marker를 배치 하여 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, 계산결과와 시각화 · 흐름의 가시화에 중요한 역할을 한다. MAC 법이 발표된 이후에 많은 수정을 거쳐 계산 시간을 현저하게 단축시킬 수 있도록 scheme을 개량한 SMAC법(Simplified Marker And Cell)이 제안되었다(Amsden and Harlow, 1970; Hirt et al, 1974). MAC 및 SMAC계열의 수치해석법은 유체의 표면형상이 시간과 더불어 연속적으로 변화하는 문제의 해석에 유용한 방법으로서, 酒井 等(1987)과 瀧川 等(1991)은 SMAC법을 이용하여 쇄파현상을 해석한 예가 있으며, 저자들도 SMAC법을 이용하여

유체의 유동현상을 수치시물레이션 한 바 있다(김과 김, 2000). 본 연구에서는 SMAC법을 이용한 2차원 월파현상을 수치시물레이션 하였으며, 그 결과를 가시화 한 것이다. 또, 보다 효율적인 가시화를 위하여 수치시물레이션 결과를 동영상으로 제작하였다.

2. 기본방정식

2차원 직교좌표계에서의 비압축성인 유동을 해석하기 위한 기본방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes방정식으로 다음과 같다.

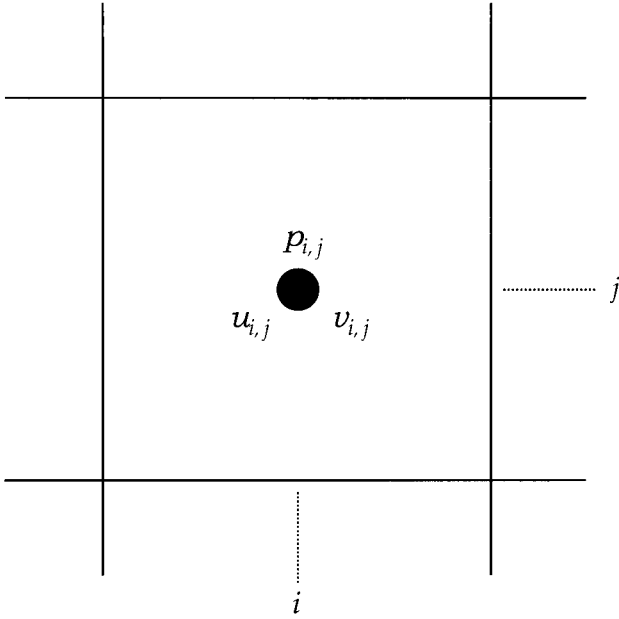
$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

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

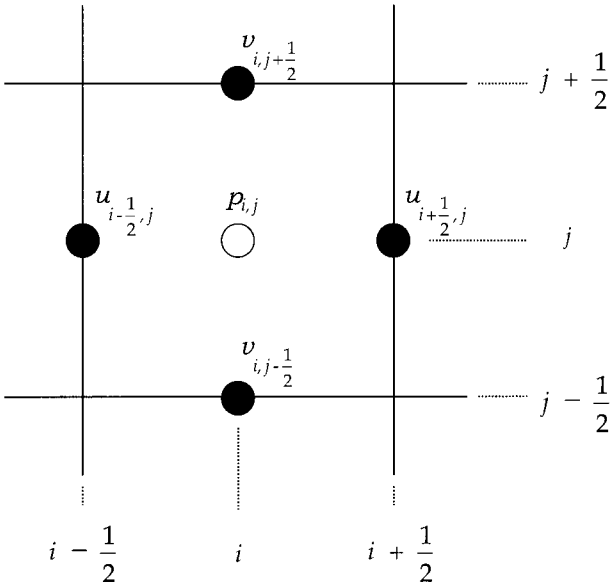
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \tag{3}$$

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 식(3)을 약간 변형하면,

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



(a) The variables in a typical mesh



(b) The variables in a staggered mesh

Fig. 1 Comparison of the variables in 2 mesh types

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

으로 된다.

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

3. 기본방정식의 이산화

편미분형태의 기초방정식을 차분으로 하기 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 Fig. 1에 나타났다.

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

또한, Fig. 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, 뒷점자 $n+1$ 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 포텐셜함수 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.

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

식 (16)을 이용하여 식 (6)을 차분하면, 다음 식이 구해진다.

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

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

여기서, 변수 ϕ 의 기호 k 는 반복계산에 의한 ϕ 의 수렴값으로 반복계산횟수를 나타내고 있다. 변수 α 는 완화계수로서 다음의 범위 ($0 \leq \alpha < 1$) 값을 사용해야 하며, 본 계산에서 α 는 0.79로 했다. 반복계산할 때에 수렴기준은 다음 식을 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 는 0.0002로 했다.

4. 계산영역 및 경계조건

본 연구에서는 Fig. 2에서 나타내듯이 5종류의 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) : 유체로만 채워진 셀
- ④ Boundary Cell(경계의 셀, B) : 해석영역을 둘러싸는 경계의 셀
- ⑤ Obstacle Cell(장애물 셀, OB) : 해석영역 내부의 고체벽과 같은 구조물을 나타내는 셀

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

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

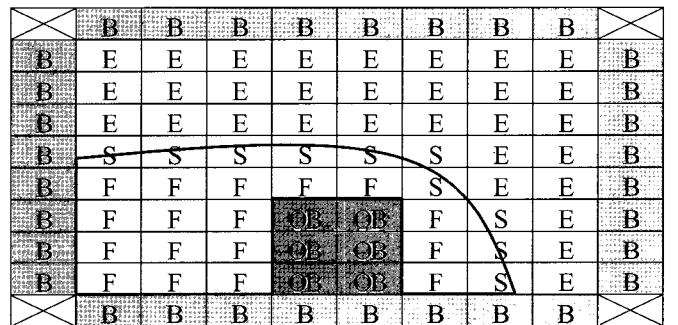


Fig. 2 Computing mesh and cell

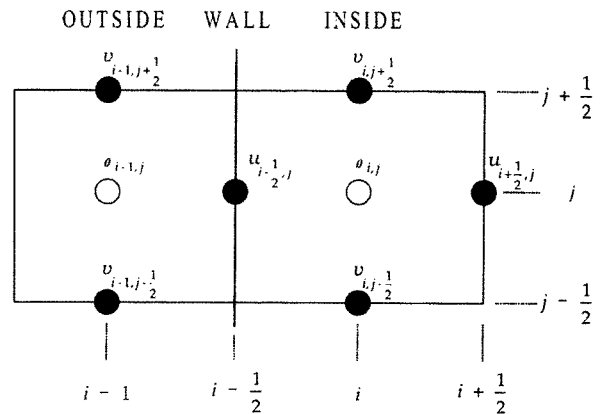


Fig. 3 The positions of variables at a left wall

으로 된다.

자유수면의 경계조건은 입자의 운동의 궤적에서 S Cell을 식별하며, 접선응력의 조건은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{21}$$

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

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

또, 법선응력의 조건은 다음과 같다.

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

5. 수치해석결과 및 고찰

수치시뮬레이션의 계산 수순을 Fig. 4에 나타낸다. 먼저, 초기 계산영역에 있어서 \tilde{u}, \tilde{v} 을 구하고, 질량보존 $D=0$ 을 만족하는 u, v 을 결정하며, 마지막 단계에서 이들을 이용하여 Marker를 이동시켜, 계산영역을 다시 설정한다. 이러한 과정을 반복하는

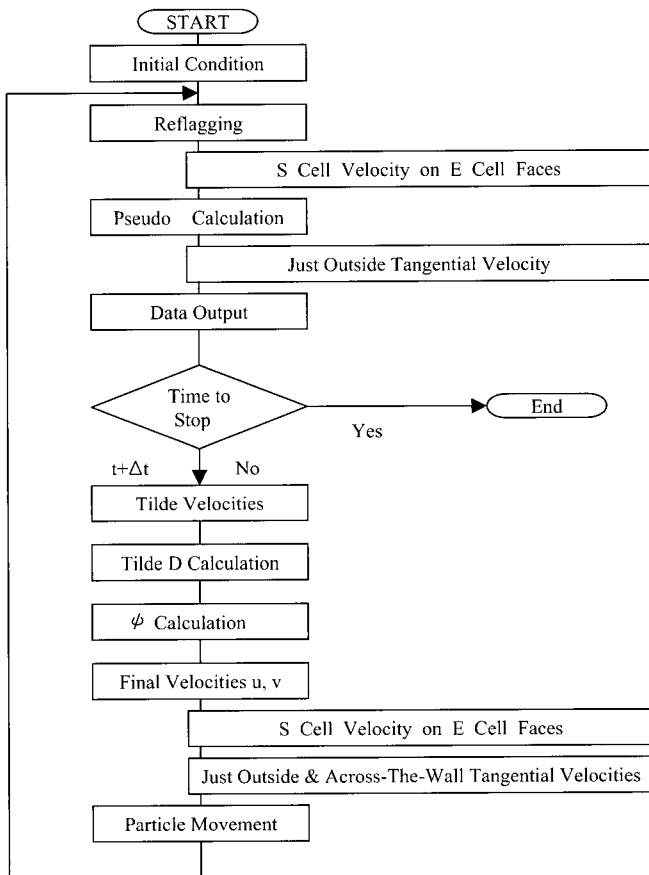


Fig. 4 Calculation algorithm of SMAC

것에 의해 각 시각에서의 속도, 압력을 구하며 연속적으로 Marker를 화면에 출력시킴으로써 애니메이션 효과를 얻는 것이다.

먼저, SMAC법을 이용한 수치시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 물기둥 붕괴현상을 수치시뮬레이션 하였다. 해석 영역의 크기를 Fig. 5에 나타낸다. x방향으로 40Cell, y방향으로 30Cell로 하였고 각 Cell의 크기는 5cm로 하였기 때문에 전체 영역은 200cm×150cm이다. 초기 물기둥의 영역은 Martin and Moyce(1952), Koshizuka and Oka(1996)가 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

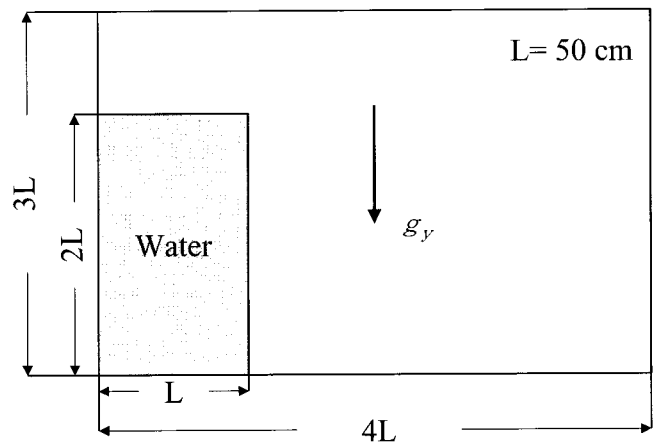


Fig. 5 Geometry of collapse of a water column

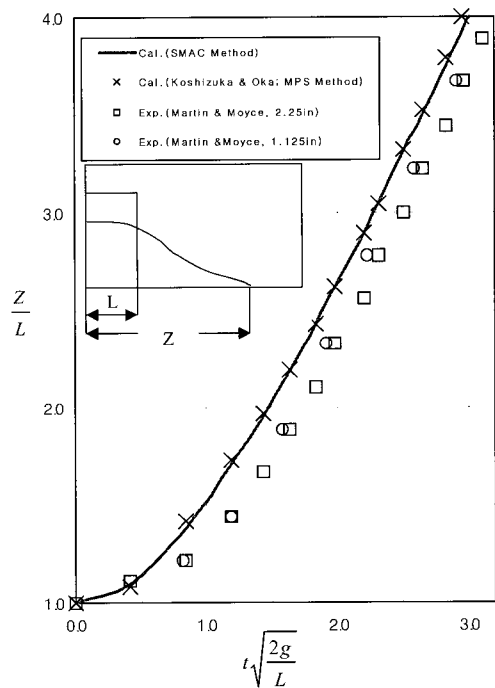


Fig. 6 Motion of the leading edge in collapse of a water column

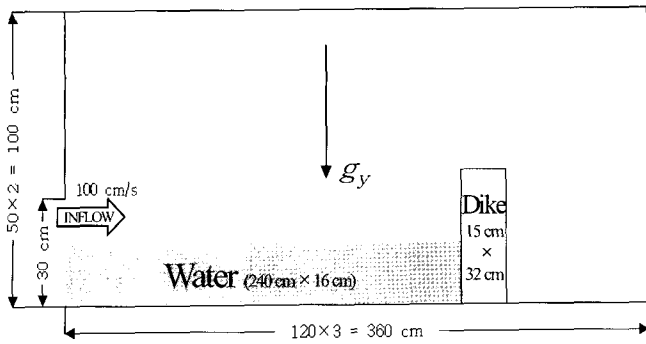


Fig. 7 Geometry of the overtopping calculation

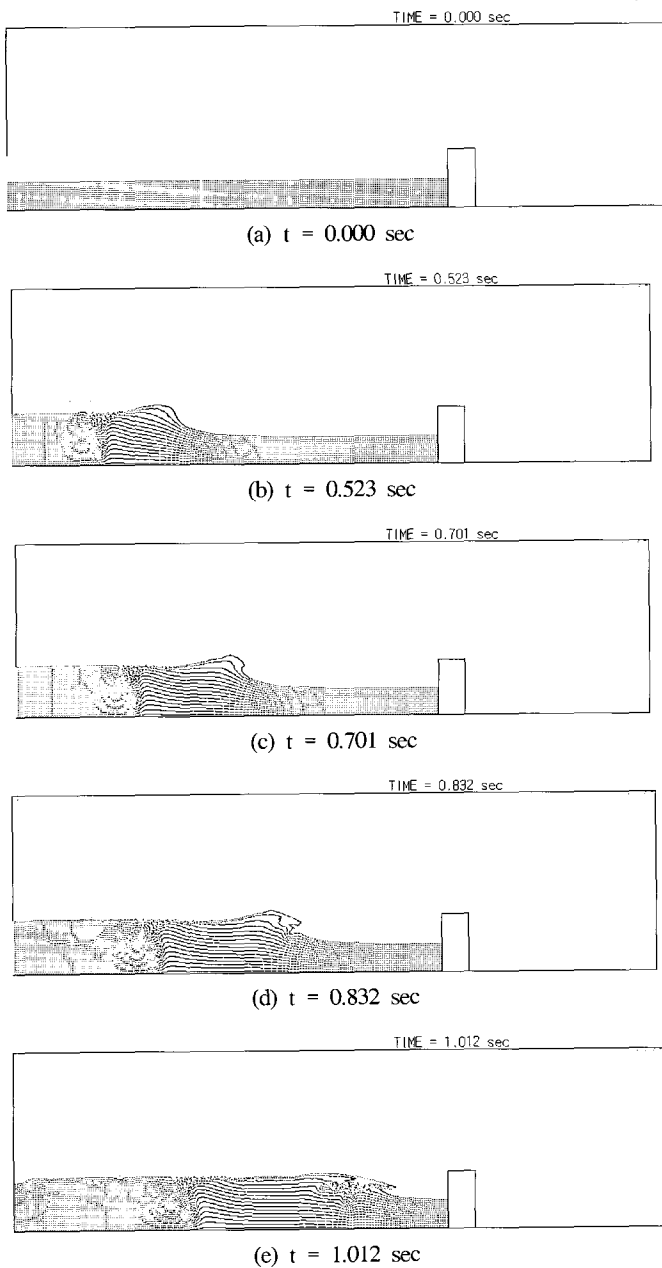


Fig. 8 Configuration of makers for the overtopping [(a)-(e)]

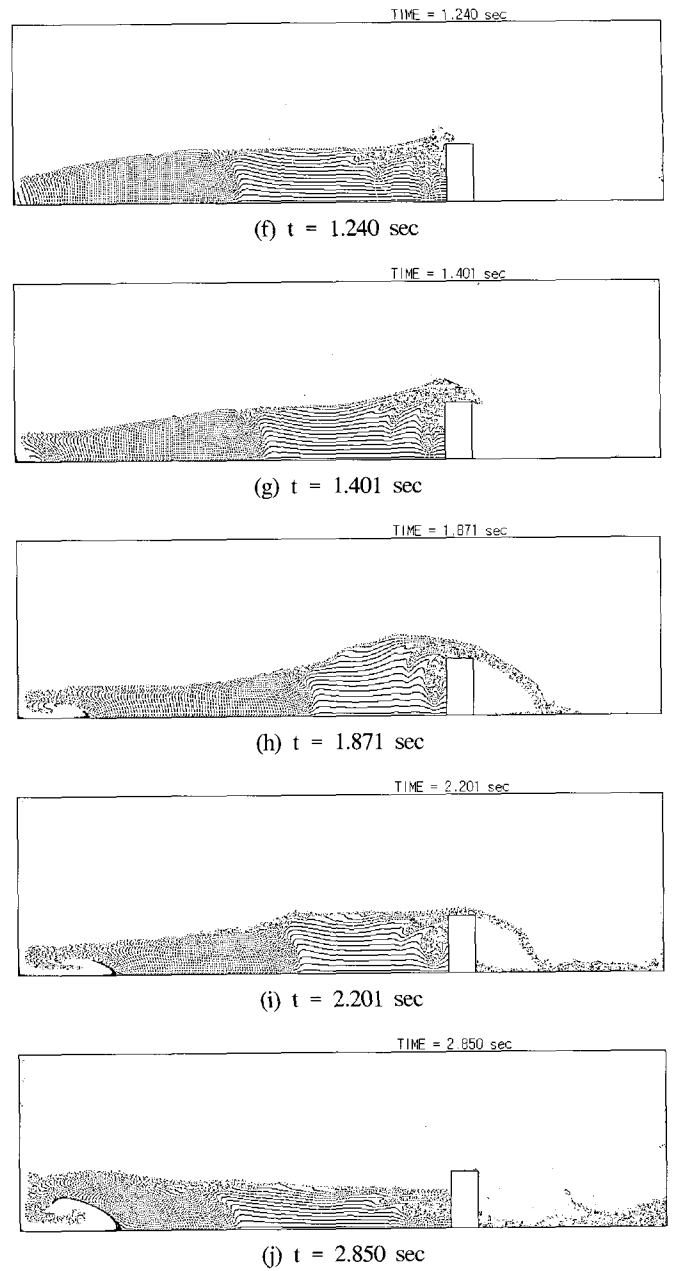


Fig. 8 Configuration of makers of the overtopping [(f)-(j)]

slip조건으로 하였으며, 중력가속도는 $g_y = -980 \text{ cm/sec}^2$ 이다. Martin and Moyce(1952)는 실험시 물기둥의 폭은 2.25inch, 1.125inch로 하였고, 물기둥의 높이는 폭의 2배를 사용하였다. Fig. 6은 물기둥 붕괴현상의 수치계산 결과를 Martin and Moyce(1952)의 실험결과 및 Koshizuka and Oka(1996)의 MPS법 계산결과와 비교하여 도표로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 가로축은 무차원시간, 세로축은 처음의 물기둥 폭과 물기둥 붕괴시 시간의 진행에 따라 선단이 퍼져 나간 거리와의 비이다. Fig. 6으로부터 SMAC법을 사용한 물기둥-붕괴의 수치계산 결과와 MPS법을 사용한 수치계산 결과는 거의 일치함을 알 수 있으며,

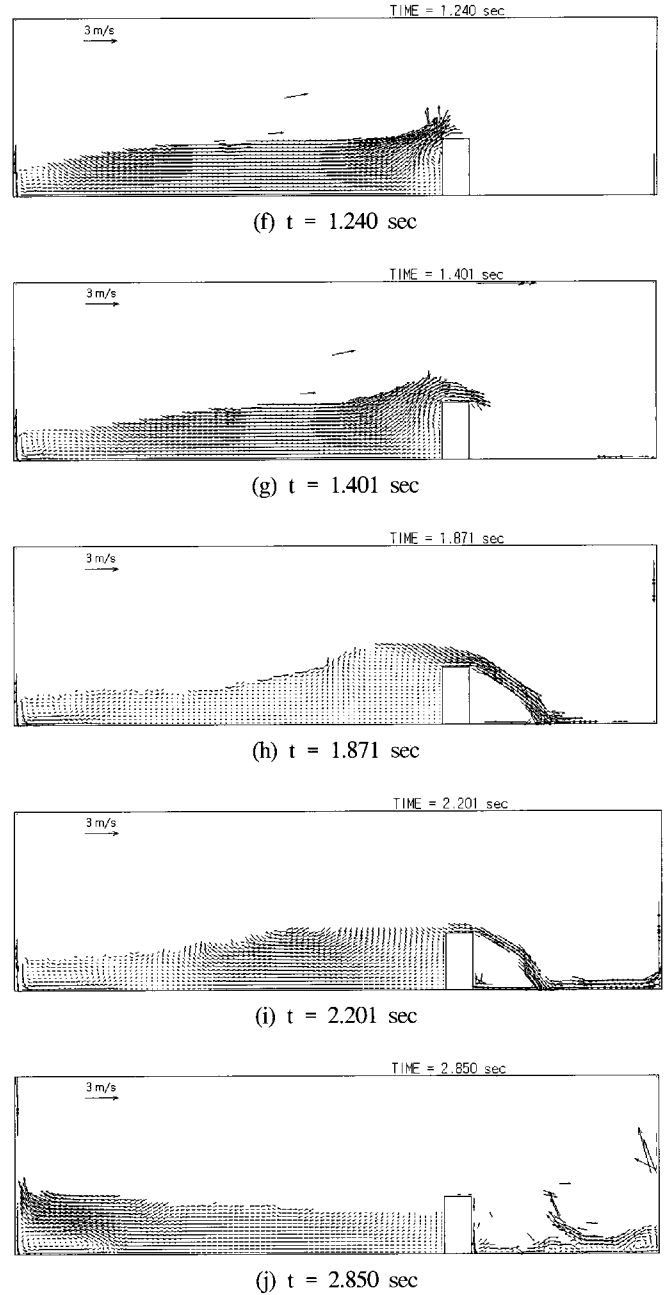
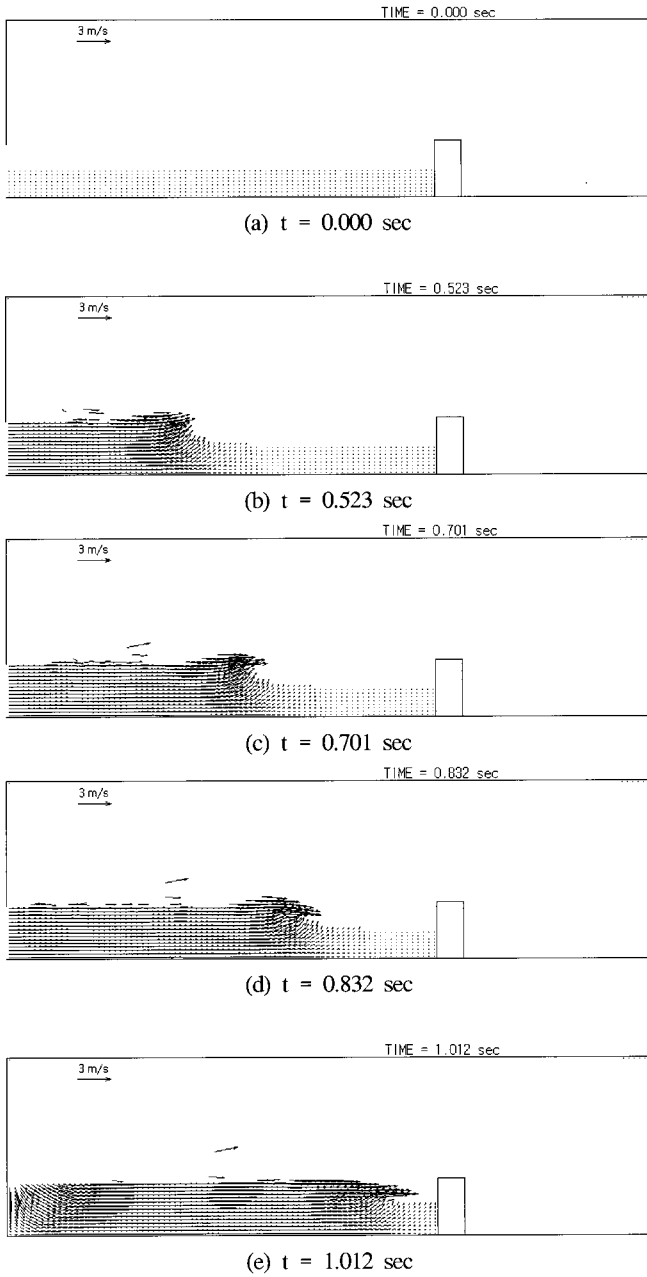


Fig. 9 Velocity vector profiles of the overtopping [(a)-(e)]

Fig. 9 Velocity vector profiles of the overtopping [(f)-(j)]

Martin and Moyce(1952)의 실험결과와도 정성적으로 유사한 물기둥의 붕괴 형상을 나타내고 있다고 사료된다.

월파현상을 가시화하기 위한 계산모델의 영역크기를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 계산영역은 x 방향으로 120cell, y 방향으로 50cell, $\delta x = 3.0$ cm, $\delta y = 2.0$ cm로 했기 때문에 전체 영역은 360 cm \times 100 cm이며, 물이 유입되기 전 구조물 왼쪽에 있는 물의 영역은 240 cm \times 16 cm이다. 경계벽의 조건은 마찰이 없는 slip조건을 사용하였으며, 동점성계수는 $\nu = 0.01$ cm²/sec로 하였고, 연직방향 가속도 즉, 중력가속도는 $g_y = -980$ cm/sec²이

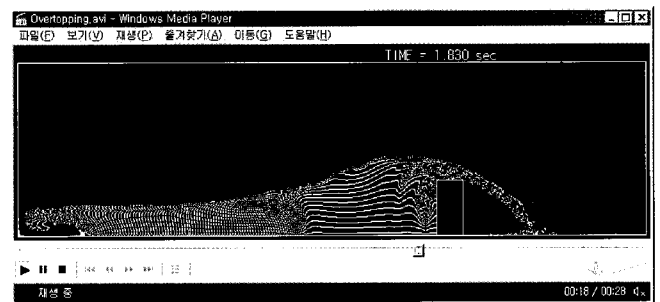


Fig. 10 A scene of the visual animation of the overtopping (<http://coastal.cheju.ac.kr/animation.htm>)

다. 또, 월파현상의 수치모의에는 30 cm 크기의 유입구를 통해 100 cm/sec의 속도로 1초간 물을 유입시킨 후 유입구가 닫혀지게 하였다.

월파현상의 가시화 결과를 marker분포와 속도벡터의 분포로 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. Fig. 8(a), Fig. 9(a)는 물이 유입되기 전 상태를 보여주고 Fig. 8(b)~(e), Fig. 9(b)~(e)는 유입구로부터 물이 유입되면서 파가 형성되어 진행해 나가는 형상을 잘 보여 주고 있다. 물의 유입이 중단된 이후에 계산영역의 왼쪽 부분에서는 순간적인 유입중단으로 인해 와류가 발생하는 형상이 관찰된다. Fig. 8(f)~(j)에서는 물의 일부는 구조물을 넘어 가며, 일부는 구조물에 부딪친 후 다시 왼쪽으로 반사되어 이동하는 형상을 잘 보여주고 있다. Fig. 9(f)~(j)의 속도벡터 분포를 살펴보면, 파가 구조물에 부딪친 후 속도벡터는 점점 감소하다가 다시 반대방향으로 증가하면서 이동하는 것을 알 수 있다. marker분포와 속도벡터의 분포는 해안에 설치되어 있는 구조물에서의 월파현상을 잘 나타내고 있다고 사료된다.

수치시물레이션의 계산결과를 보다 효율적으로 가시화 하기 위하여 동영상으로 제작하였다. 제작된 동영상의 일부를 Fig. 10에 나타낸다. 또, 제작된 동영상은 정보의 공유화를 위하여 제주대학교 해안 및 항만공학 연구실 홈페이지에서 볼 수 있다 (<http://coastal.cheju.ac.kr/animation.htm>).

6. 결 론

본 연구는 월파현상을 가시화하기 위해 SMAC법을 이용하여 수치시물레이션을 수행하였다. SMAC법을 이용한 수치시물레이션의 타당성을 검증하기 위해 물기둥 붕괴의 수치시물레이션을 수행하였고, 그 결과를 Martin and Moyce(1952)의 실험 결과 및 Koshizuka and Oka(1996)의 MPS법 계산결과와 비교하여 매우 좋은 결과가 얻어졌다. 해안에 설치되어 있는 구조물에서의 월파현상을 수치시물레이션 하였으며, 그 계산결과를 Marker와 속도벡터의 분포로 나타냈다. Marker와 속도벡터의 분포는 현실적인 월파현상의 가시화를 잘 나타내고 있다. 또한, 보다 효율적인 가시화를 위하여 수치계산 결과를 동영상으로 제작하였다.

본 논문에서는 비교적 단순한 형태의 구조물과 계산영역만을 고려하여 수치시물레이션을 하였으나, 호안이나 방파제 등에서의 월파와 같은 실제적인 유동현상을 예측하고 그 결과를 가시화하기 위해서는 좀더 현실적인 구조물, 계산영역의 확대, 다양한 경계조건의 적용 등이 필요하며, 앞으로 해결해야 할 연구과제이겠다.

참 고 문 헌

- 김남형, 김남국(2000). “가상수조에서 자유표면을 가진 유체흐름의 가시화 시뮬레이션”, 한국해양공학회지, 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.
- 瀧川 清, 山田文彦, 有元光久, 田淵幹修(1991). “斜面上の碎波變形過程の内部特性とその數値解析”, 海岸工學論文集, 第38卷, pp 61~65.
- 保原 充, 大宮司久明 編(1992). “數值流體力學: 基礎と應用”, 東京大學出版會.
- 越塚誠一(1999). 數值流體力學, 培風館.
- 酒井哲郎, 水谷太作, 田中秀明(1987). “斜面上の巻き波型碎波の碎波後の運動機構の數値解析”, 第34回海岸工學論文集, pp. 71~75.

2001년 9월 27일 원고 접수

2001년 10월 29일 수정본 채택