

< 논문 >

개량된 SIMPLE 알고리즘을 이용한 비압축성 자유계면유동의 수치해석

목진호[†] · 홍준표* · 이진호**

(2004년 12월 27일 접수, 2005년 3월 21일 심사완료)

Modified SIMPLE Algorithm for the Numerical Analysis of Incompressible Flows with Free Surface

Jinho Mok, Chun Pyo Hong and Jinho Lee

Key Words : Free Surface(자유계면), SIMPLE(심플), Implicit Method(암시법), Time Saving(시간절약)

Abstract

While the SIMPLE algorithm is most widely used for the simulations of flow phenomena that take place in the industrial equipments or the manufacturing processes, it is less adopted for the simulations of the free surface flow. Though the SIMPLE algorithm is free from the limitation of time step, the free surface behavior imposes the restriction on the time step. As a result, the explicit schemes are faster than the implicit scheme in terms of computation time when the same time step is applied to, since the implicit scheme includes the numerical method to solve the simultaneous equations in its procedure. If the computation time of SIMPLE algorithm can be reduced when it is applied to the unsteady free surface flow problems, the calculation can be carried out in the more stable way and, in the design process, the process variables can be controlled based on the more accurate data base. In this study, a modified SIMPLE algorithm is presented for the free surface flow. The broken water column problem is adopted for the validation of the modified algorithm (MoSIMPLE) and for comparison to the conventional SIMPLE algorithm.

기호설명

a, b : 이산화방정식의 계수
 P' : 압력수정
 u, v, P : 속도, 압력
 u^*, v^*, P^* : 1차속도, 예측압력
 V : 체적
 $\Delta x, \Delta y$: 제어체적 길이
 μ : 동점성계수
 ρ : 밀도

상첨자

old : 이전 시간단계

하첨자

p, e, w, n, s : 제어체적위치

1. 서론

자유계면의 특성이 고려되는 산업분야는 금형설계(주조산업)^(1,3), 댐이나 교량(토목산업)^(4,5), 엔진(자동차산업, 우주항공)^(7,9) 등 매우 다양하며 우리 생활과 밀접하게 관련되어 있다. 제트엔진을 포함한 각종 엔진부품들은 구조공정을 통해 생산되며, 댐의 붕괴로 인한 물의 유동, 교량주변의 유동 등의 정확한 해석은 국가 기간산업에 있어 매우 중요한 요인이 될 수 있으며, 열교환기 내 냉매의 상변화 열전달은 자유계면 이상유동의 대표적 예이다. 이와 같이 자유계면유동은 많은 산업분야에서 매우 중요한 고려대상이며 그 응용 예 역시 다양하다. 흡기벨브를 통해 엔진내부로 분사되는 연료의 액적이나 노즐을 통해 분사되어 임의의 벽면

[†] 책임저자, 회원, Nano Cast Korea

E-mail : mok@camp.yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4499 FAX : (02)3147-2643

* 연세대학교 금속시스템공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

에 고착되는 액적 등 역시 자유계면의 해석에 의해 접근 가능한 분야들이다. 제품설계나 결합제어를 위하여 시행착오법이 흔히 도입되던 시기에는 공정 자체가 시간과 비용소모적이었다. CAE의 도입은 시행착오의 회수나 사이클 타임을 줄여주는 데 큰 역할을 하였다. 계산시간이나 수치해석의 정확도는 생산성과 직접 연관되기 때문에 전산모델에 관한 연구, 특히 새로운 전산모델의 개발이 매우 활발히 이루어져 왔다.^(10,14) 최근 전산유체의 흐름은 정확도 및 계산시간에 있어서 매우 만족할 만한 암시적 방법의 일종인 SIMPLE 알고리즘에 기초한 계산이 주류를 이루지만,^(15,20) 자유계면유동의 수치해석은 대부분 현시적인 방법에 의하여 이루어지며 이는 자유계면이 갖는 자유계면의 거동에 의해 주어지는 계산시간간격의 제한 때문이다.^(11,12) 자유계면의 추적에 위해서는 체적분율의 이동방정식(advection equation)을 풀어야 하며, 이 방정식의 이산화는 현시적인 방법에 근거하므로 시간간격의 제약은 피할 수 없다. 같은 시간대에 같은 시간간격을 이용한 계산에 있어서 현시적인 방법은 암시적인 방법에 비하여 매우 빠른 계산이 가능하며 이는 운동량방정식의 이산화식으로 구성되는 연립방정식을 풀 필요가 없기 때문이다. 만약에 자유계면유동의 계산을 위하여 SIMPLE 알고리즘의 계산시간을 단축시킬 수 있다면 제품설계에 있어 더욱 정확한 해석에 의한 정보를 얻는 것이 가능하다.

본 연구에서는 기존의 SIMPLE 알고리즘을 자유계면유동에 적합하도록 개량하였으며, 개량된 SIMPLE 알고리즘을 맴봉고 시뮬레이션에 적용하고 그 결과를 실험 그리고 기존의 SIMPLE 알고리즘에 의한 계산 결과와 비교하였다.

2. 수치해석방법

2.1 자유계면의 추적

자유계면의 거동은 다음의 미분방정식에 의하여 계산할 수 있다.

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

이는 연속방정식과 유사한 형태를 가지며, 자유계면의 이동을 체적분율의 이동현상으로 해석하게 된다. 이 식은 현시적인 방법에 의하여 다음과 같이 이산화된다.

$$F_p = F_p^{old} - \frac{\Delta t}{\Delta x_p} (u_e^{old} F_e^{old} - u_w^{old} F_w^{old}) - \frac{\Delta t}{\Delta y_p} (v_n^{old} F_n^{old} - v_s^{old} F_s^{old}) \tag{2}$$

이때 제어체적의 경계를 통과하는 체적유량 $u_e^{old} F_e^{old}$ 등의 값은 표준 DAFA(Donor and Acceptor Flux Approximation)법에 의하여 결정되며 자세한 사항은 문헌을 참조하기 바란다.⁽¹²⁾ 자유계면 유동은 그 이력(history)이 매우 중요하며 또한 현시적인 이산화식의 유도과정으로 인하여 운동량 방정식의 이산화방법과는 무관하게 한 시간단계에서 유체가 두 개 이상의 미소제어체적을 이동할 수 없다는 계산시간 간격에 대한 제약이 따르게 된다. 이러한 이유로 기존의 자유계면 이동현상에 대한 해는 같은 시간간격이 적용될 때 계산시간상 유리한 현시적인 방법을 적용해왔고 현재도 가장 널리 이용되는 방법이다. 일단 유동장을 구하기 위한 알고리즘이 결정되면 다음의 계산순서에 의하여 자유계면의 추적이 이루어진다.

- (1) 유동장의 계산
- (2) 계산된 유동장에 의하여 각 미소제어체적에서의 체적분율 계산식 (2)
- (3) 각 미소제어체적에서의 체적분율에 의하여 영역 구분(Fig. 1)
- (4) 새로운 유체영역에 대한 경계조건식을 가지고 과정 (1)로 돌아가 원하는 시간 혹은 시점까지 반복

2.2 유동장의 계산 알고리즘

SIMPLE 알고리즘에서 이용되는 각종 이산화식의 유도과정은 본 논문에서는 취급하지 않고, 참고문헌으로 대신하고자 한다.⁽²¹⁾ 다음은 기존의 SIMPLE 알고리즘에 대한 설명이다. 각 식은 암시적인 방법에 기초하고 쉬운 이해를 위하여 2 차원 직교(Cartesian)좌표계를 기준으로 공간에 대하여 풍상차분도식(upwind scheme)을 적용하였으며, 운동량방정식의 이산화는 엇갈린 격자계에서 이루어졌다. Fig. 2 은 엇갈린 격자계에서 x 및 y 방향 속도와 스칼라변수가 정의되는 제어체적을 보여준다.

(1) 운동량방정식의 이산화 방정식의 각 계수를 계산한다.

$$a_{up}u_p = a_{ue}u_e + a_{uw}u_w + a_{un}u_n + a_{us}u_s + b_u - \frac{\Delta y_p}{\rho} (P_E - P_W) \tag{3}$$

$$a_{ue} = \mu_E \frac{\Delta y_p}{\Delta x_E} + \max[-\rho_E u_E \Delta y_p, 0]$$

$$a_{uw} = \mu_W \frac{\Delta y_p}{\Delta x_W} + \max[\rho_W u_W \Delta y_p, 0]$$

$$a_{un} = \mu_N \frac{\Delta x_p}{\Delta y_N} + \max[-\rho_N v_N \Delta x_p, 0]$$

$$a_{us} = \mu_S \frac{\Delta x_p}{\Delta y_S} + \max[\rho_S v_S \Delta x_p, 0]$$

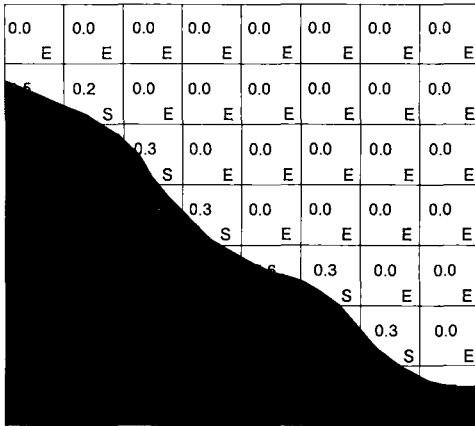


Fig. 1 Free surface tracking by volume fraction (E : Empty cell $F_p = 0$, F:Full fluid cell $F_p = 1$, S : Free surface cell $0 < F_p < 1$)

$$a_{up}^0 = \frac{\rho_p^{old} \Delta x_p \Delta y_p}{\Delta t}$$

$$a_{up} = a_{up}^0 + a_{ue} + a_{uw} + a_{un} + a_{us}$$

$$b_u = a_{up}^0 u_p^{old}$$

$$a_{vp} v_p = a_{ve} v_e + a_{vw} v_w + a_{vn} v_n + a_{vs} v_s$$

$$+ b_v - \frac{\Delta x_p}{\rho} (P_N - P_S) \tag{4}$$

$$a_{ve} = \mu_E \frac{\Delta y_p}{\Delta x_E} + \max[-\rho_E u_E \Delta y_p, 0]$$

$$a_{vw} = \mu_W \frac{\Delta y_p}{\Delta x_W} + \max[\rho_W u_W \Delta y_p, 0]$$

$$a_{vn} = \mu_N \frac{\Delta x_p}{\Delta y_N} + \max[-\rho_N v_N \Delta x_p, 0]$$

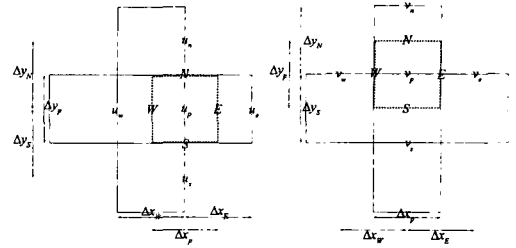
$$a_{vs} = \mu_S \frac{\Delta x_p}{\Delta y_S} + \max[\rho_S v_S \Delta x_p, 0]$$

$$a_{vp}^0 = \frac{\rho_p^{old} \Delta x_p \Delta y_p}{\Delta t}$$

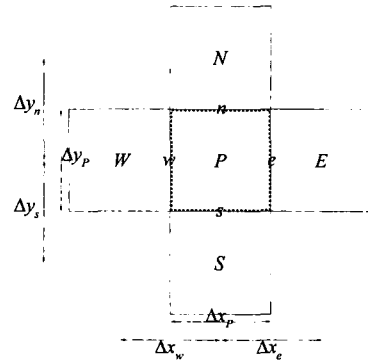
$$a_{vp} = a_{vp}^0 + a_{ve} + a_{vw} + a_{vn} + a_{vs}$$

$$b_v = a_{vp}^0 v_p^{old}$$

(2) 압력 P 를 가정 (P^*) 하고 식 (3), (4)로 주어진 이산화식의 연립방정식을 풀어 1차 속도장 u^*, v^* 를 계산한다.



(a) Control volumes for x and y-directional velocities



(b) Control volume for scalar variables

Fig. 2 Control volumes in the staggered grid system

$$a_{up} u_p^* = a_{ue} u_e^* + a_{uw} u_w^* + a_{un} u_n^* + a_{us} u_s^* + b_u - \frac{\Delta y_p}{\rho} (P_E^* - P_W^*) \tag{5}$$

$$a_{vp} v_p^* = a_{ve} v_e^* + a_{vw} v_w^* + a_{vn} v_n^* + a_{vs} v_s^* + b_v - \frac{\Delta x_p}{\rho} (P_N^* - P_S^*) \tag{6}$$

(3) 1차 속도장에 의하여 연속방정식을 나타내는 생성항 계산한다.

$$b = \frac{\Delta x_p \Delta y_p}{\Delta t} (\rho_p^{old} - \rho_p) + \Delta y_p (\rho_w u_w^* - \rho_e u_e^*) + \Delta x_p (\rho_s v_s^* - \rho_n v_n^*) \tag{7}$$

(4) 만약에 b 가 충분히 작거나 0에 근접했다면, 1차 속도장 u^*, v^* 와 예측 압력장 P^* 는 올바른 속도장과 압력장이 된다. 따라서 단계 (1)로 돌아가 다음 시간단계인 $t + \Delta t$ 단계의 계산으로 진행. 만약 b 가 충분히 작지 않은 경우 과정 (5)로 진행한다.

(5) 압력수정방정식을 풀어 P' 을 계산한다.

$$a_p P'_p = a_E P'_E + a_w P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b \quad (8)$$

: Pressure Correction Equation

$$a_E = \rho_e \frac{\Delta y_p^2}{a_{ue}}, a_w = \rho_w \frac{\Delta y_p^2}{a_{uw}}$$

$$a_N = \rho_n \frac{\Delta x_p^2}{a_{vn}}, a_S = \rho_s \frac{\Delta x_p^2}{a_{vs}}$$

$$a_p = a_E + a_w + a_N + a_S$$

(6) P' 에 의하여 1차 속도장 u^*, v^* 와 예측 압력장 P^* 를 수정한다.

$$u_e = u_e^* + \frac{\Delta y_p}{a_{ue}} (P'_p - P'_E)$$

$$u_w = u_w^* + \frac{\Delta y_p}{a_{uw}} (P'_p - P'_W)$$

$$v_n = v_n^* + \frac{\Delta x_p}{a_{vn}} (P'_p - P'_N) \quad (9)$$

$$v_s = v_s^* + \frac{\Delta x_p}{a_{vs}} (P'_p - P'_S)$$

$$P = P^* + P'$$

(7) 수정된 압력 P 를 새로운 예측 압력장으로 두고 과정 (1)로 되돌아가 계산을 반복한다.

식 (3), (4)의 계수 a_{up} 및 $a_{ue}, a_{uw}, a_{un}, a_{us}$ 등은 유동의 특성에 따라 결정된다. SIMPLE 알고리즘에 의한 연산은 암시적인 이산화방법의 채택으로 인하여 시간간격에 대한 제약이 없다. 식 (3), (4)의 계수들은 내부반복계산이 진행될 때 마다 새롭게 계산되어야 하고 당연히 그에 해당하는 연립방정식을 풀어야 한다. 결과적으로, 하나의 시간단계의 계산을 마치기 위하여 한 번의 계산으로 해를 구하는 현시적인 방법보다 같은 시간간격이 적용되는 경우 암시적인 방법이 시간소모적 계산이 되는 것은 당연한 귀착이다. 본 방법은 비록 계산이 시간간격에 무관하게 안정적이지만, 시간간격은 운동량방정식이 아닌 자유계면 유동의 이산화 과정에서 제한된다. 같은 시간간격이라면 이미 언급한 바와 같이 현시적인 방법에 의한 해법이 연립방정식을 풀어야 하는 암시적인 방법에 의한 해법에 비해 훨씬 빠르다. 이런 이유 때문에 자유계면유동의 수치해석에서는 생성항 처리가 안정적이고 시간간격의 제약이 없이 정확한 계산이 가능한 암시적인 방법보다 다소의 정확도 희생을 감수한 현시적인 방법이 보편적으로 이용되는 것이다. 만약에 식 (3), (4)의 계수가 고정될 수 있다면, 식 (5), (6)의 연립방정식을 푸는데 소비되는

시간을 줄이면서 암시적인 방법의 장점을 희생을 최소화할 수 있다. 이것이 새로운 알고리즘의 기본 이론이다. 다음의 알고리즘을 살펴본다.

(1) 이전 단계 속도장 u^{old}, v^{old} 를 참조로 식 (3), (4)의 계수를 식 (10), (11)와 같이 계산한다.

$$a_{ue} = \mu_E \frac{\Delta y_p}{\Delta x_E} + \max[-\rho_E u_E^{old} \Delta y_p, 0]$$

$$a_{uw} = \mu_W \frac{\Delta y_p}{\Delta x_W} + \max[\rho_W u_W^{old} \Delta y_p, 0] \quad (10)$$

$$a_{un} = \mu_N \frac{\Delta x_p}{\Delta y_N} + \max[-\rho_N v_N^{old} \Delta x_p, 0]$$

$$a_{us} = \mu_S \frac{\Delta x_p}{\Delta y_S} + \max[\rho_S v_S^{old} \Delta x_p, 0]$$

$$a_{ve} = \mu_E \frac{\Delta y_p}{\Delta x_E} + \max[-\rho_E u_E^{old} \Delta y_p, 0]$$

$$a_{vw} = \mu_W \frac{\Delta y_p}{\Delta x_W} + \max[\rho_W u_W^{old} \Delta y_p, 0] \quad (11)$$

$$a_{vn} = \mu_N \frac{\Delta x_p}{\Delta y_N} + \max[-\rho_N v_N^{old} \Delta x_p, 0]$$

$$a_{vs} = \mu_S \frac{\Delta x_p}{\Delta y_S} + \max[\rho_S v_S^{old} \Delta x_p, 0]$$

(2) 압력 P 를 가정 (P^*) 하고 식 (5), (6)로 주어진 이산화식의 연립방정식을 풀어 1차 속도장 u^*, v^* 를 계산한다.

(3) 1차 속도장에 의하여 연속방정식을 나타내는 생성항 계산한다.

(4) 만약에 b 가 충분히 작거나 0 에 근접했다면, 1차 속도장 u^*, v^* 와 예측 압력장 P^* 는 올바른 속도장과 압력장이 된다. 따라서 단계 (1)로 돌아가 다음 시간단계인 $t + \Delta t$ 단계의 계산으로 진행. 만약 b 가 충분히 작지 않은 경우 과정 (5)로 진행한다.

(5) 압력수정방정식을 풀어 P' 을 계산한다.

(6) P' 에 의하여 1차 속도장 u^*, v^* 와 예측 압력장 P^* 를 수정한다.

(7) 수정된 속도장 u, v 와 압력장 P 를 1차 속도장 및 예측압력장으로 두고 단계 (3)으로 되돌아가 계산을 반복한다.

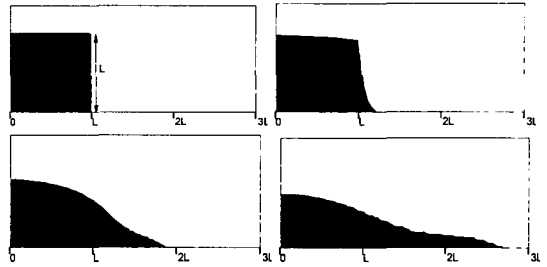
계수 a_{up} 와 $a_{ue}, a_{uw}, a_{un}, a_{us}$, 등의 계산이 본 개정알고리즘의 핵심이다. 각 계수의 계산방법

만이 달라질 뿐, 이산화식에서 u_p, u_e, u_w, u_n, u_s 와 v_p, v_e, v_w, v_n, v_s 는 여전히 같은 시간단계에서 계산되는 값들이기 때문에 기본적으로 암시적인 방법에 의한 해석이 된다. 식 (10), (11)의 계수들이 u^{old}, v^{old} 를 기반으로 계산되기 때문에, 한 시간단계 내에서는 계수들을 다시 계산할 필요가 없어지게 되고, 결국 단계 (7)에서와 같이 계산은 단계 (1)부터가 아니라 단계 (3)부터 반복된다. 즉, 2 차, 3 차, 4 차, ... 속도장은 속도수정만을 통해서 얻어진다. 이것이 개량된 알고리즘이 어떻게 계산시간을 개선할 수 있는가에 대한 핵심이고 암시적인 방법에 기초하기 때문에 안정성 및 계산의 정확도가 유지될 수 있는 것이다. 궁극에는 해의 불안정성을 초래하는 Non-Newtonian flow, external sources, turbulent flow 등의 처리가 암시적인 접근법의 안정성에 기초하여 매우 용이해질 수 있다. (이후로 MoSIMPLE 알고리즘이라는 용어를 개량된 SIMPLE 알고리즘의 약어로서 사용한다.) 그러나 시간간격의 제약이 없는 비정상문제의 경우 기존의 SIMPLE 알고리즘이 더 적합하며, 정상 상태의 문제에서는 MoSIMPLE 알고리즘과 기존의 알고리즘의 차이가 없어진다. 이는 운동량 방정식의 계수 a_{up} 및 $a_{ue}, a_{uw}, a_{un}, a_{us}$ 등이 이전시간단계의 값으로부터 단 한번만 계산되기 때문이다.

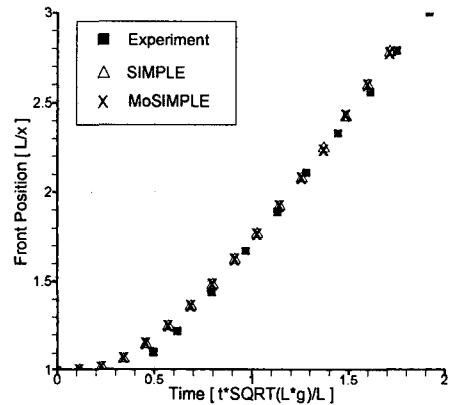
3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석모델의 검증

새 알고리즘의 검증을 위하여 모형 댐 붕괴 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다.⁽¹⁾ Fig. 3 (a)는 자유계면 추적을 위한 해석모델과 MoSIMPLE 알고리즘에 의한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 수치해석시 사용된 격자수는 3496 개 ($x:y=92:38$)이고 등간격으로 배치하였다. Fig. 3 (b)는 실험결과와 수치해석 결과를 그래프상에서 비교하여 보여주고 있으며, x 축은 무차원 시간 ($=t\sqrt{L\cdot g}/L$)을 y 축은 무차원 거리 ($=L/x$)를 각각 나타낸다. 각기 다른 표시(■△×)는 시간에 따른 자유계면의 위치에 대한 실험결과와 수치해석결과를 의미한다. 비록 댐붕괴 초반의 두 해석결과 간에 작은 차이가 있지만, 대체로 잘 일치하고 있다. 실험 결과를 나타내는 Fig. 2(b)의 검정색 네모표시로부터 최전



(a) Dimension of water column and successive collapse sequences



(b) Comparison of experimental and numerical results

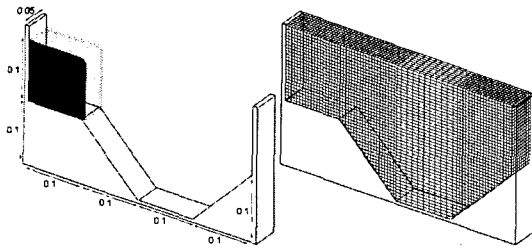
Fig. 3 Validation of MoSIMPLE algorithm

방의 자유계면의 속도가 사각모양의 물기둥의 붕괴가 진행됨에 따라 점차 가속되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 SIMPLE 알고리즘에 의한 수치해석결과와 MoSIMPLE 알고리즘에 의한 수치해석결과 모두에서 잘 나타나고 있다. 그리고 두 수치해석 결과는 오차범위 0.4%안에서 일치하고 있다.

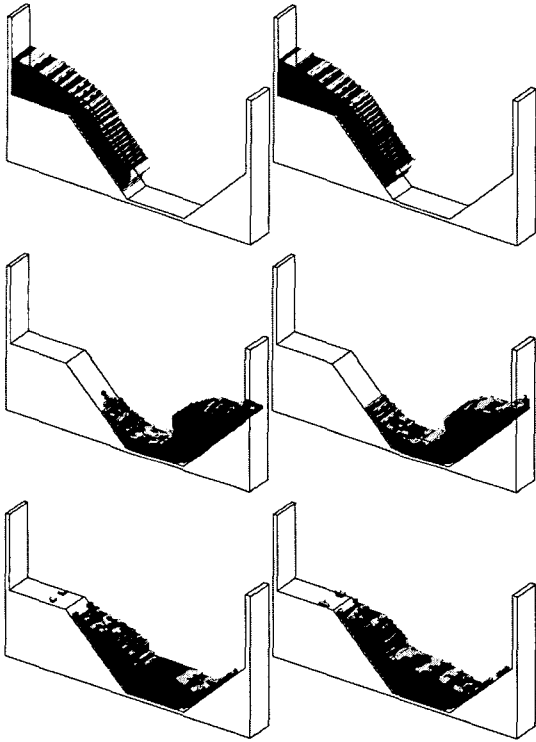
3.2 기존의 SIMPLE 알고리즘과의 비교

Fig. 4(a)는 3 차원 댐붕괴 해석을 위한 또 다른 모형모델이며, 두 개의 수치해석 알고리즘에 의한 결과를 비교하였다. Fig. 3(b)는 두 해석 알고리즘에 의한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 계산에 사용된 격자의 개수는 40608 개 ($x:y:z=72:47:12$)이며, 수렴조건으로 다음의 조건을 이용하였다.

$$\frac{\sum_{i,j,k=1}^{n_x, n_y, n_z} |b_{i,j,k}|}{\rho V_{water}} < 0.5 \times 10^{-4} \quad (12)$$



(a) Physical model for broken water column (unit: m)

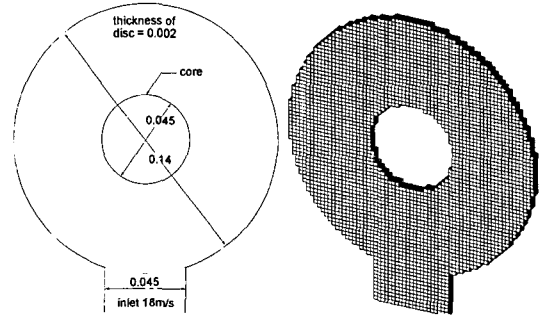


By SIMPLE algorithm By MoSIMPLE algorithm

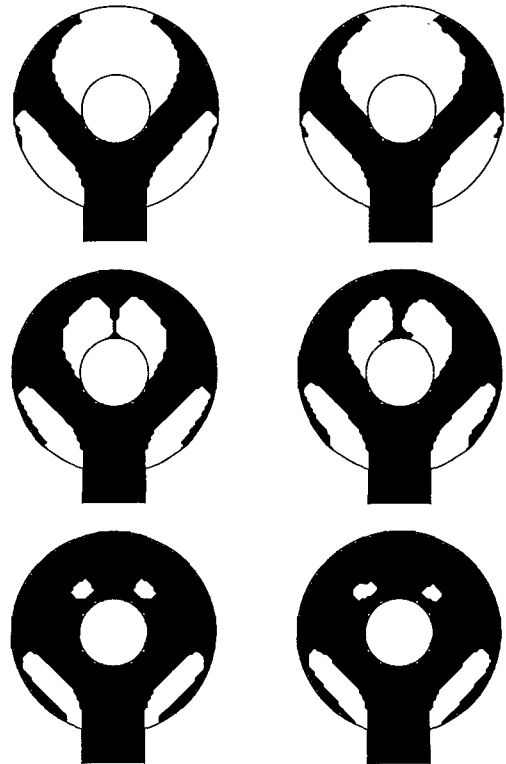
(b) Successive collapse of water column (0.4s, 1.2s, and 2.0s)

Fig. 4 Test model for simulation of broken water column and snap shots

이때 V_{water} 는 물의 초기 총 체적을, $b_{i,j,k}$ 는 식 (7)의 생성항을 나타낸다. 계산에 이용된 컴퓨터는 Pentium III 866 MHz 이었다. 물의 붕괴가 진행됨에 따라 아래쪽의 저수조를 채우기 시작하며, 반대편 경계에 이르러 벽을 타고 물기둥이 올라가다 되돌아 나오는 모양을 볼 수 있다. 이러한 과정에서 나타나는 물결 현상은 시간의 진행과 함



(a) Physical model for broken water column (unit: m)



By SIMPLE algorithm By MoSIMPLE algorithm

(b) Successive filling process (48%, 76%, and 90%)

Fig. 5 Test model for simulation of mold filling and snap shots

께 점차 소멸되고 궁극에는 잔잔한 수면을 이루게 된다. 비록 두 해석결과가 매우 잘 일치하고 있지만 거기에는 주목할 만한 차이가 있다. 그것은 Table 1 에 주어진 계산시간 이다. 표에서 댐붕괴 이후 10 초 동안 물기둥의 거동을 해석하는데 걸린 계산시간은 비교해서 보여준다. 기존의 SIMPLE 알고리즘에 비하여 MoSIMPLE 알고리즘에 의한 계산에서 계산시간이 약 48%

Table 1 Comparison of calculation time of broken water column

		SIMPLE	MoSIMPLE
CPU time (s)	Broken Water Column	14766	7622
	Mold Filling	14652	6396

가량 개선되었으며, 이 차이는 다름아닌 한 시간단계에서 풀어야 하는 운동량방정식의 연립방정식의 계산에 소요되는 시간의 차이이다. 개량된 SIMPLE 알고리즘에 의한 계산시간의 단축은 좀더 복잡한 물리적 현상을 동반하는 자유계면 유동의 안정적인 수치해석이 가능하게 해주며, 더불어 일반적으로 알려진 사실인 암시적인 방법의 해의 정확도 역시 유지할 수 있다.

Fig. 5 는 금형충전의 한 예를 보여준다. 사용된 모델은 코어를 가진 디스크형 주물의 충전과정을 해석하기 위한 금형이며, 주조 공정에서 자유계면 유동의 수많은 구조결함을 야기시키는 매우 중요한 제어대상 중의 하나가 된다. 계산을 위한 충전유체로는 물을 사용 하였으며 주입속도는 $0.00162m^3/s$ (inlet velocity = $18m/s$)이다. 계산에 사용된 총 격자의 개수는 38808 개 ($x:y:z = 72:77:7$)이고, 댐붕괴 해석 과 동일한 컴퓨터가 사용되었다. 물이 주입구를 통해 내부로 충전되기 시작한 직후, 코어에서 물은 두 갈래 갈라져 상단 경계에 이르고 원주경계를 따라 자유계면이 형성되었다. 충전완료까지 계산을 진행시킨 결과, 최종 충전부위가 두 개의 해석 결과에서 동일하게 나타났으며, 충전경향 역시 거의 일치하고 있음을 Fig.을 통해 알 수 있다. 그러나 계산시간에서는 큰 차이를 보였다. Table 1 에 두 해석알고리즘에 의한 계산시간을 비교하여 나타내었으며 MoSIMPLE 알고리즘에 의한 계산에서 약 56%의 계산시간 단축이 이루어졌다. 사용된 수렴조건은 식 (12)와 동일하며 단 V_{water} 는 물의 총체적이 아닌 주어진 시간간격 동안 금형 내로 주입된 물의 총체적을 나타낸다.

마지막으로 본 알고리즘은 SIMPLE 알고리즘에 기초하고 있기 때문에 SIMPLE 알고리즘을 적용하는 모든 상용코드나 인하우스코드에 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

4. 결론

SIMPLE 알고리즘을 개량하여 자유계면 유동을 해석하기 위한 새로운 알고리즘을 개발하였으며, 이를 통하여 기존의 방법에 비하여 계산시간을

상당히 단축할 수 있었다. 본 알고리즘을 댐붕괴 해석 및 충전해석에 적용했으며, 그 결과를 SIMPLE 알고리즘에 의한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 댐붕괴 실험결과와 두 해석알고리즘에 의한 수치해석결과를 비교한 결과 실험결과와 수치해석결과가 잘 일치하였다.

(2) 또 다른 댐붕괴모델 및 충전모델에 두 수치해석 알고리즘을 적용시킨 결과, MoSIMPLE 알고리즘을 적용할 경우 계산시간이 댐붕괴 모델 및 충전모델에서 각각 48%, 56%씩 개선 됨을 알 수 있었다.

(3) 본 알고리즘의 장점 중의 하나는 기존의 SIMPLE알고리즘을 적용하는 모든 프로그램에 쉽게 적용할 수 있다는 점이다.

참고문헌

- Heut, J.F. and Ilinca, F., 1999, "A Finite Element Method for Casting Simulations," *Numerical Heat Transfer A*, Vol. 36, pp. 657~679.
- Ginzburg, I. and Steiner, K., 2003, "Lattice Boltzmann Model for Free Surface Flow and its Application to Filling Process in Casting," *Journal of Computational Physics*, Vol. 185, pp. 61~99.
- Maronnier, V., Picaso, M. and Rappaz, J., 2003, "Numerical Simulation of Three Dimensional Free Surface Flows," *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol. 42, pp. 697~716.
- Dimas, A.A. and Fialkowski, L.T., 2000, "Large Wave Simulation(LWS) of Free Surface Flows Developing Weak Spilling Breaking Waves," *Journal of Computational Physics*, Vol. 159, pp. 172~196.
- Nguyen, V.Y. and Nestmann, F., 2004, "Application of CFD in Hydraulics and River Engineering," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 18, No. 2, pp. 165~174.
- Fabri, G., 2000, "Effect of Disuniformities in Vapor Saturation Pressure and Coolant Velocity on Vapor Back Flow Phenomena in Single Pass Air-Cooled Condensers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 147~159.
- Rosner, D.E., 1967, "On Liquid Droplet Combustion at High Pressure," *AIAA Journal*, Vol. 5, No. 1, p. 163.
- Law, C.K., 1982, "Recent Advanced in Droplet Vaporization and Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 8, pp. 171~201.
- Miyagawa, H., Nagaoka, M., Ohsawa, K. and Yamada, T., 1998, "Spray Vaporization Model for Multi-component Gasoline," *JSAE Review*, Vol. 19, pp. 299~304.
- Welch, J.E., Harlow, F.H., Shannon, J.P. and Daly, B.J., 1996, "The MAC Method: A Computing Technique for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid Flow Problems Involving Free

- Surfaces," *Technical Report LA-3425*, Los Alamos Scientific Laboratory.
- (11) Amsden, A.A. and Harlow, F.H., 1970, "The SMAC Method: A Numerical Technology for Calculating Incompressible Flows," *Technical Report LA-4370*, Los Alamos Scientific Laboratory.
- (12) Nichols, B.D., Hirt, C.W. and Hotchkiss, R.S., 1980, "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries," *Technical Report LA-8355*, Los Alamos Scientific Laboratory.
- (13) Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., 1994, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two Phase Flow," *Journal of Computational Physics*, Vol. 114, pp. 146~159.
- (14) Son, G., 2003, "Efficient Implementation of a Coupled Level Set and Volume of Fluid Method for Computing Three Dimensional Incompressible Two Phase Flow," *Numerical Heat Transfer A*, Vol. 43, pp. 549~565.
- (15) Lee, K., Mok, J. and Lee, J., 2001, "The Effect of Thermosolutal Convection on Macroseggregation During Alloy Solidification," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1337~1345.
- (16) Lee, S.Y., Lee, S., Nishido, S. and Hong, C.P., 2003, "Development of a New Simulation Method of Mold Filling Based on a Body Fitted Coordinate System," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 15, pp. 389~393.
- (17) Bennon, W.D. and Incropera, F.P., 1987, "A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change System - I. Model Formulation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 10, pp. 2161~2170.
- (18) Bennon, W.D. and Incropera, F.P., 1987, "A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change System - II. Application to Solidification in a Rectangular Cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 10, pp. 2171~2187.
- (19) Mok, J., Patankar, S. V. and Lee, J., 2002, "A Study on the Development of a Three Dimensional Numerical Model for the Casting Processes," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1436~1444.
- (20) Mok, J., Park, S. J. and Lee, J., 2004, "Development of a New Simulation Method of Casting Process Based on a Cylindrical Coordinate System," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 4, pp. 433~440.
- (21) Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington.