

## 〈학술논문〉

## 비정렬격자계에 적합한 경계면포착법에서의 HR 도식 비교연구

명 현 국\*

(2007년 8월 2일 접수, 2007년 10월 15일 심사완료)

Comparative Study on High Resolution Schemes  
in Interface Capturing Method Suitable for Unstructured Meshes

Hyon Kook Myong

**Key Words:** High Resolution Scheme(HR 도식), Interface Capturing Method(경계면포착법), Unstructured Meshes(비정렬격자계), Free Surface Flow(자유표면 유동)

## Abstract

Two high resolution compressive schemes, CICSAM(Ubbink, 1997) and HRIC(Muzaferija & Peric, 1999), in interface capturing method are reviewed briefly with respect to the extended forms suitable for unstructured meshes. And then those are applied to three typical test cases of translation test, shearing flow test and collapsing water problem with an obstacle. It is accomplished by implementing the high resolution schemes in the in-house CFD code(PowerCFD) for computing 3-D flow with an unstructured cell-centered method, which is based on the finite-volume technique and fully conservative. The calculated results show that CICSAM is better than HRIC with respect to accuracy and robustness, although either scheme can be used as a good choice for free surface or two-phase flow simulation.

## 1. 서 론

자유표면 유동에 대한 해석은 기포나 액적이 포함된 이상(two-phase) 유동에서부터 수중의 및 해양구조물 주변에서 발생하는 복잡한 유동현상에 이르기까지 공학적으로 매우 중요하다. 따라서 자유표면 유동에 대한 해석은 실험에만 그치지 않고, 새로운 수치해석 기법들의 개발로 인해 그 현상을 지배하는 물리법칙을 수치적으로 해석하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 현재 자유표면 유동현상들을 해석하기 위해 제안된 많은 수치해석 기법 중에서, 셀(또는 검사체적)내에 액상의 체적비로 정의된 VOF(Volume Of Fluid) 값  $\alpha$  를 사용하여 상경계면을 추적하는 VOF 방법<sup>(1)</sup>이

대부분의 상용 CFD코드에서 사용되고 있다. 이것은 이 방법이 각 상의 체적이 잘 보존되는 장점 때문에 현재 이상유동의 물리적인 현상을 왜곡 없이 표현할 수 있는 대표적인 방법으로 인식되고 있기 때문이다. 그러나 기존의 VOF 방법들은 거의 대부분 정렬 사각형 격자계에 적합한 형태로, 임의의 형상을 가지는 비정렬격자계에는 직접 적용될 수 없는 근본적인 문제점을 가지고 있다.

한편, VOF법은 검사체적 내 자유표면의 위치와  $\alpha$  값을 기하학적인 방법을 동원하여 직접적으로 추적하고 계산하는 경계면추적법(interface tracking method)<sup>(1,2)</sup>과  $\alpha$ 를 자유표면의 정확한 위치에 대한 정보가 필요 없는 함수형태로 표현하고 이를 이송하는 방정식을 HR(High Resolution)도식으로 풀어 경계면의 움직임을 포착하는 경계면포착법(interface capturing method)<sup>(3,4)</sup>으로 크게 구분된다. 이 두 방법은 고정격자계를 사용한다는 공통점을 가지고 있으나, 방법론에 따라 장단점을 가지고

\* 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

E-mail : myong@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4714 FAX : (02)910-4839

있다. 즉, 상용 CFD 코드에서 많이 채용하고 있는 경계면추적법은 자유표면의 정확한 위치를 추적해 내는 장점이 있다. 그러나  $\alpha$ 의 이류를 수치확산 없이 계산하기 위해 계산적으로 복잡한 상경계면 재구성과정을 거치기 때문에 적용범위가 완전한 경계면을 가지는 자유표면유동으로 제한되며, 경계면의 접힘(fold) 및 파열(rupture)을 다룰 수 없는 근본적인 문제점을 가지고 있다. 또한 일반적으로 이 방법에서 사용되는 기하학적 재구성(geometric reconstruction) 도식은 비정렬 격자계 및 3차원 문제인 경우 매우 복잡하게 된다. 이에 반해 경계면포착법은 보다 적은 계산상의 노력으로 경계면이 혼합 또는 분리되는 등의 변화가 큰 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 3차원 문제의 확장도 용이한 장점을 가지고 있으나, 일반적으로 번짐(smearing)과 같은 경계면의 비물리적인 변형 및 수치확산이 문제시된다. 따라서 경계면의 비물리적인 변형 및 수치확산을 개선하기 위해 최근 상류 및 하류차분도식을 혼합하여 나타낸 HR 도식인 CICSAM(Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)<sup>(3)</sup> 및 HRIC(High Resolution Interface Capturing)<sup>(4)</sup> 방법이 제안되었다.

최근 Myong and Kim<sup>(5)</sup>은 비정렬 셀 중심방법을 채용하고 압력수정방법에 기반을 둔 3차원 유동 해석코드(PowerCFD)<sup>(6)</sup>에 경계면포착법을 도입하여 다상유동과 같이 자유표면이 존재하는 복잡한 유동현상들을 해석할 수 있는 비정렬격자계에 적합한 수치해석방법을 개발하였다. 그러나 경계면포착법에서 HR 도식들 간의 비교우위에 대한 근본적인 검증은 충분히 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 경계면포착법에서 문제가 되는 번짐과 수치확산 문제를 개선하기 위해 제안된 HR 도식인 CICSAM<sup>(3)</sup> 및 HRIC<sup>(4)</sup> 방법에 관해 비정렬격자계에 적합한 수치해석방법 면에서 간략하게 살펴본다. 참고로 HRIC 방법은 상용 CFD 코드에 도입되어 사용되고 있다. 그리고 수치해석 방법의 검증을 위해 널리 활용되고 있는 2차원 Translation test<sup>(7)</sup> 및 Shearing flow test<sup>(2,8)</sup>에 대해 두 도식에 따른 계산결과들을 서로 비교함으로써 각 방법의 정확성과 타당성을 확인할 뿐만 아니라, 두 도식간의 상대적인 비교우위성을 확인한다. 또한 Myong and Kim<sup>(5)</sup>이 자유표면 유동해석을 위해 개발한 해석코드(PowerCFD)의 수치해석 방법상 견고함(robustness)을 확인하기 위해 바닥면

에 장애물이 존재하는 댐붕괴 문제에 대한 두 도식의 수치계산결과들을 실험결과들<sup>(9)</sup>과 비교·고찰한다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 지배방정식

유동을 비압축성이라고 가정하면, 기상-액상 모든 영역에 적용되는 질량보존, 운동량보존 및 VOF 값  $\alpha$ 에 대한 지배방정식은 다음과 같이 적분형태로 표현할 수 있다.

$$\int_S \underline{v} \cdot d\underline{S} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho \underline{v}) dV + \int_S [\rho \underline{v} \otimes \underline{v}] \cdot d\underline{S} = \int_S \underline{\tau} \cdot d\underline{S} - \int_S p d\underline{S} + \int_V \underline{s} dV \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha dV + \int_S \alpha \underline{v} \cdot d\underline{S} = 0 \quad (3)$$

그리고 국소물성치인 밀도와 점성계수는 다음과 같이 계산한다.

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (5)$$

여기서 아래첨자 1과 2는 다른 종류의 유체를 각각 나타내며,  $\alpha$ 는 0과 1 사이의 값을 가진다.

### 2.2 $\alpha$ 에 대한 이산화방정식

식 (3)을 셀(체적  $V_p$ )에 대해 이산화하고 시간 변화  $\delta t$ 가 충분히 작다면, 일반적으로 셀 면에서의 체적유량  $Q_f$ 는  $\alpha_f$ 에 비해 무시할 정도의 미소변화량을 가지기 때문에 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서 액상 체적비  $\alpha$ 에 대한 최종 이산화식은 다음과 같다.

$$\alpha_p^{t+\delta t} = \alpha_p^t + \frac{\delta t}{V_p} \sum_{f=1}^n \alpha_f^* Q_f \quad (6)$$

위식을 정확하게 계산하기 위해서는 셀 면에서의  $\alpha_f^*$ 를 수치확산을 최소화시키며 구할 수 있는 이류 알고리즘, 즉 해의 한정성(boundedness)을 보장하면서도 급격한 기울기를 가지는 경계면을 유

지하도록 인접한 셀 중심값을 사용하여 적절히 보간하여  $\alpha_f^*$ 를 구하는 방법이 필요하다.

### 2.3 HR 도식

본 연구에서는 셀 면에서의  $\alpha_f^*$ 를 구하기 위해 기존의 경계면포착법에 적용된 여러 차분도식들이 가지고 있는 경계면의 번짐현상과 같은 물리적으로 부적합한 변형과 수치확산 문제점 및 정렬사각형 격자계로만 제한되는 한계점을 극복한 것으로 알려진 두 가지 HR 도식을 사용한다. 여기서 HR도식은 다양한 방법으로 재구성 될 수 있으나, 본 연구에서는 식 (6)에 나타난 이산화 방정식의 형태에 한성정기준을 적용하기에 가장 적절한 NVD(Normalized Variable Diagram)<sup>(10)</sup>에 기초한 형태로 나타낸다. 아래 식은 NVD 개념을 활용한 정규화변수(normalized variable)인  $\tilde{\alpha}_D$ 와  $\tilde{\alpha}_f$ 의 정의 및 비정렬격자계에 적합한 일반적인 형태를 각각 나타낸다.

$$\tilde{\alpha}_D = \frac{\alpha_D - \alpha_U}{\alpha_A - \alpha_U} = 1 + \frac{\alpha_D - \alpha_A}{2(\nabla\alpha)_D \cdot \underline{d}} \quad (7)$$

$$\tilde{\alpha}_f = \frac{\alpha_f - \alpha_U}{\alpha_A - \alpha_U} = 1 + \frac{\alpha_f - \alpha_A}{2(\nabla\alpha)_D \cdot \underline{d}} \quad (8)$$

여기서 아래첨자  $U, D$  그리고  $A$ 는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 1차원적으로 이웃하는 셀로 Upwind 셀, Donor 셀 및 Acceptor 셀을 각각 나타낸다. 그러나 정렬격자계와는 달리 격자간의 연결성에 규칙성이 없는 비정렬격자계에서는 일반적으로 Upwind 셀을 정의하는 것이 용이하지 않다. 따라서 비정렬격자계에서는 Upwind 셀의 값을 경계면에 인접한 Donor 셀의 구배값과 Acceptor 셀의 값 및  $\underline{d} = \underline{r}_A - \underline{r}_D$ 로부터 벡터연산을 사용하여 외삽으로 구하며, 이 값을 대체시킨 형태가 위 두식에서의 마지막 형태이다.<sup>(5)</sup>

#### CICSAM

CICSAM은 Donor-Acceptor 방법의 개념으로부터 출발하는 것으로, 해의 안정성은 보장하지만 수치 확산 및 번짐현상이 심한 상류차분도식과 한정성은 유지하지 않으나 급격한 기울기를 가지는 경계면을 잘 보존해주는 특성을 가진 하류차분도식을 셀 면과 유동의 움직임 방향이 이루는 각을

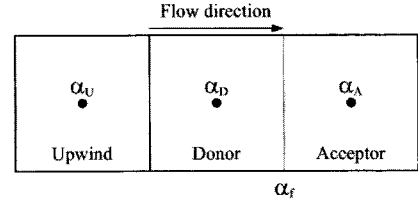


Fig. 1 One dimensional control volume

활용하여 두 가지 도식을 혼합하여 나타낸 형태이다. 즉, CICSAM에서는  $\tilde{\alpha}_f$ 상의 국소한정기준을 항상 만족할 수 있는 정규화변수의 범위를 규정하는 CBC(Convective Boundedness Criteria)의 상한을 따르는 Hyper-C 도식<sup>(11)</sup>을 하류차분도식으로 사용하며, 그 형태는 다음과 같다.

$$\tilde{\alpha}_{f_{CBC}} = \begin{cases} \max \left[ \tilde{\alpha}_D, \min \left\{ 1, \frac{\tilde{\alpha}_D}{c_D} \right\} \right] & \text{for } 0 \leq \alpha_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{for } \tilde{\alpha}_D < 0, \tilde{\alpha}_D > 1 \end{cases} \quad (9)$$

여기서, CFL 수인  $c_D$ 는 다음과 같다.

$$c_D = \sum_{f=1}^n \max \left\{ \frac{Q_f \delta t}{V_D}, 0 \right\} \quad (10)$$

한편, Hyper-C도식은 실제적으로 경계면의 형상을 보장하지 못하는 경향을 가진다. 따라서 더 나은 경계면의 형상을 보장하기 위해 또 다른 도식으로의 전환이 필요하게 된다. CICSAM에서는 가장 우수한 성능을 가진 것으로 알려진 다음과 같은 UQ(Ultimate-Quickest) 도식<sup>(11)</sup>을 상류차분도식으로 사용한다.

$$\tilde{\alpha}_{f_{UQ}} = \begin{cases} \min \left\{ \frac{8c_D \tilde{\alpha}_D + (1 - c_D)(6\tilde{\alpha}_D + 3)}{8}, \tilde{\alpha}_{f_{CBC}} \right\} & \text{for } 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{for } \tilde{\alpha}_D < 0, \tilde{\alpha}_D > 1 \end{cases} \quad (11)$$

마지막으로 앞에서 언급한 것과 같이 수치확산이 적은 정규화된 셀 면에서의 값을 예측하기 위해 CICSAM에서는 셀 면과 유동의 움직임방향이 이루는 각을 고려하여 유연하게 변하는 가중계수

( $\gamma_f$ )를 사용하여 식 (9)와 식 (11)의 전환이 자동적으로 이루어지는 아래 식을 구성한다.

$$\widetilde{\alpha}_f = \gamma_f \widetilde{\alpha}_{f_{CBC}} + (1 - \gamma_f) \widetilde{\alpha}_{f_{VQ}} \quad (12)$$

### HRIC

HRIC는 상류차분도식의 안정성과 하류차분도식의 함축적인 속성의 혼합을 위해 CICSAM과 유사하게 한정된 상류 및 하류차분도식의 혼합에 기초하는 방법이다. 여기서, 한정된 하류차분도식은 다음과 같이 표현된다.

$$\widetilde{\alpha}_f^{**} = \begin{cases} 2\widetilde{\alpha}_D & \text{for } 0 \leq \widetilde{\alpha}_D \leq 0.5 \\ 1 & \text{for } 0.5 < \widetilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \widetilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (13)$$

그리고 일정한 구간으로 구분된 CFL 수에 대해서 다음과 같이 경험에 기초해서 셀 면에서의 정규화 변수값을 재차 수정하는 과정을 거친다.

$$\widetilde{\alpha}_f^{**} = \begin{cases} \widetilde{\alpha}_f^{**} & \text{for } c_D < 0.3 \\ \widetilde{\alpha}_D + (\widetilde{\alpha}_f^{**} - \widetilde{\alpha}_D) \frac{0.7 - c_D}{0.4} & \text{for } 0.3 \leq c_D < 0.7 \\ \widetilde{\alpha}_D & \text{for } 0.7 \leq c_D \end{cases} \quad (14)$$

최종적으로 HRIC에서는 다음과 같은 경계면의 법선벡터와 셀 면의 법선벡터가 이루는 각  $\theta$ 에 따른 수정과정을 수행한다.

$$\widetilde{\alpha}_f = \sqrt{\cos\theta} \widetilde{\alpha}_f^{**} + (1 - \sqrt{\cos\theta}) \widetilde{\alpha}_D \quad (15)$$

### 2.4 비정렬격자계에 적합한 $\alpha_f^*$ 계산 방법

한편, 기존의 VOF 방법에서는 일정한 형태의 정렬격자에만 사용이 국한된 현시적 분할자(split operator)를 적용하고 있기 때문에, 새로운 시각에서의  $\alpha$ 를 나타내는 임의의 특정 셀 면을 통과한 체적비의 총합이 좌표축의 방향에 따른 전개(sweep)순서에 따라 다르게 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 식 (6)에서 필요로 하는 셀 면에서의  $\alpha_f^*$ 값을 다음과 같이 2차 정확도를 가진 Crank-Nicholson 도식의 형태로 구하여,

$$\alpha_f^* = \frac{1}{2} (\alpha_f^t + \alpha_f^{t+\delta t}) \quad (16)$$

전개순서에 대한 의존성을 제거함으로써 비정렬 격자계에도 용이하게 적용될 수 있도록 한다. 또한 식 (16)으로 정의된 새로운 시점에서의 가중계수가 시간간격이 매우 짧다면 경계면과 유동의 움직임 방향이 이루는 각도변화가 매우 작으므로, 현시점의 가중계수로 대체되어도 무방하다고 할 수 있다. 따라서 최종적으로 셀 면에서의  $\alpha_f^*$ 값은 식 (7), 식 (8) 및 식 (16)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha_f^* = (1 - \beta_f) \frac{\alpha_D^t + \alpha_D^{t+\delta t}}{2} + \beta_f \frac{\alpha_A^t + \alpha_A^{t+\delta t}}{2} \quad (17)$$

$$\beta_f = \frac{\widetilde{\alpha}_f - \widetilde{\alpha}_D}{1 - \alpha_D} \quad (18)$$

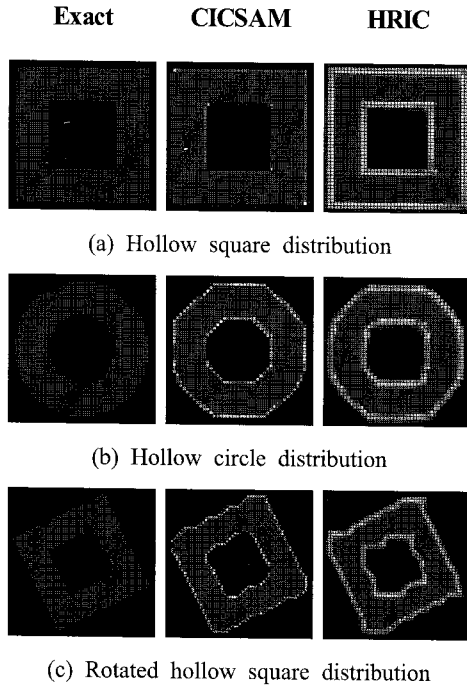
참고로 식 (18)로 표현된 가중계수( $\beta_f$ )는 유동방향에 관계된 경계면의 방향뿐만 아니라 Upwind 셀을 포함하여 Donor 셀 및 Acceptor 셀에서의 모든 정보를 함축적으로 포함하고 있다.

본 연구에서는 위에 기술한 두 도식을 Myong and Kim<sup>(5)</sup>이 자유표면 유동해석을 위해 개발한 해석코드에 적용하여 수치해석을 수행하였다.

## 3. 계산결과 및 검토

### 3.1 Translation test

두 도식의 정확성 및 타당성을 검증하기 위해서 Rudman<sup>(7)</sup>에 의해 제안된 간단한 2차원 체적이류문제인 Translation test를 수행하였다. 수치해석을 위한 전체계산영역의 크기는  $4 \times 4 \text{ m}^2$ 이며, 사용한 격자수는 비정렬 사각형 격자계로 40000 ( $200 \times 200$ )개이다. 그리고 일정한 두께를 가지는 속이 빈 사각형, 속이 빈 원과 기울어진 속이 빈 사각형이 포함된 모든 계산영역에 대해 일정한 속도장으로  $(u, v) = (2, 1)$ 을 주었으며, 주어진 형상의 크기는 바깥쪽으로 0.8 m이며 두께는 바깥쪽을 기준으로 0.2 m이다.<sup>(7)</sup> 이와 같은 계산조건하에서 중력이나 표면장력에 의한 생성항이 전혀 존재하지 않고 일정 속도만이 존재하므로, 물리적으로 자유표면에 해당하는 경계선은 시간에 따른 변화 없이 그 형상을 유지하며 이동하여야 한다.



**Fig. 2** Hollow square, hollow circle and rotated hollow square distributions after 1100 time steps with  $(u, v) = (2, 1)$

Fig. 2는 Translation test를 위한 각각의 초기 설정값에 의해 나타나는 상이한 초기형상과 시간단계가 1100단계 이후인 1.1s일 때의 일정한 속도장에 의해 이동되어 나타난 예측 값을 사용된 격자계와 함께 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에 나타낸 속이 빈 사각형의 형상은 CICSAM이나 HRIC 두 도식 모두 전체적인 초기 형상은 시간이 경과한 이후에도 그대로 유지되고 있다. 하지만, HRIC 도식을 적용한 예측결과에서는 CICSAM 도식의 결과에 비해 네 변과 모서리 부분에서 기존 형상을 기점으로 수치계산을 위해 사용한 셀의 두 세 개 정도의 수치적 번짐 및 확산현상이 발생되어 결과적으로 네 변에서 찌그러지는 현상과 모서리에서 둥근형상이 발생하고 있다. 이와 같은 HRIC 도식을 적용하였을 경우 나타나는 수치적 번짐 및 확산현상은 Fig. 2(b) 및 (c)에 나타낸 속이 빈 원형과 기울어져 있는 속이 빈 사각형에서도 유사하게 나타나고 있다. 다만, 속이 빈 원형의 경우, Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 두 도식 모두 최종적으로 다소 팔각형에 가까운 형상으로 나타나고,

기울어진 속이 빈 사각형인 경우, 속도방향과 수직을 이루는 변 부분에서 다소 찌그러지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 각각의 수치해석방법에 적용된 실제적인 경계면의 형상을 보장하기 위한 방법의 한계점 때문에 나타난 결과라고 사료된다.

### 3.2 Shearing flow test

앞 절에서 언급한 Translation test에서 속도장은  $\nabla \cdot v = 0$ 와  $\partial u / \partial x = 0$  및  $\partial v / \partial y = 0$ 를 만족하는 간단한 속도장이기 때문에 초기에 주어진 유체영역의 크기 및 형상은 시간의 변화에 따른 이송에 의해 그 크기나 형상이 크게 변하지 않는다. 즉 기존의 Translation test는 실제유동 현상에서 나타나는 중요한 문제인 유체전단현상에 대한 고려가 결여되어 있다. 따라서 둥근 원형형상을 가지는 유체영역에 대해 일정하게 주어지는 회전하는 속도장을 통해 이송되는 유체영역의 질량보존 법칙이 만족하는지 알아보기 위한 Shearing flow test가 새로운 해석방법의 정확성을 검증하기 위해 여러 연구자들<sup>(2,8)</sup>에 의해 제안되었다.

본 Shearing flow test를 위한 수치계산영역의 전체크기는  $\pi \times \pi \text{ m}^2$ 이고, 수치계산을 위해 사용된 격자수는 비정렬 사각형 격자계로 10000 ( $100 \times 100$ )개이다. 그리고 시간간격은  $\Delta t = 0.001$ 이다. 이와 같은 조건에서 수치계산영역 내부에 존재하면서 시간단계별로 이동하는 액체영역은 Fig. 3에 나타낸 것과 같고, 다음과 같이 주어지는 일정한 속도장에 의해 이동한다.

$$u(x, y) = \sin(x)\cos(y) \tag{19}$$

$$v(x, y) = -\cos(x)\sin(y)$$

여기서 초기단계에 주어지는 둥근형상의 크기와 중심의 위치는 Fig. 3(a)와 같이 반지름이  $\pi/5 \text{ m}$ 이고, 중심은  $(x, y) = (\pi/4, \pi/2)$ 에 위치한다.

Fig. 3(b)는 시간단계별로 일정하게 주어진 속도장 즉 시계반대방향으로 회전하는 유동장에 의해 이동한 결과를 시간단계 8000에서 나타낸다. Fig. 3(b)의 결과를 보면 CICSAM 도식보다 HRIC 도식을 적용하였을 경우가 수치적 번짐 및 확산현상이 현저함을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 3(c)는 시간단계 0에서 8000까지는 시계반대방향으로 회전하는 일정한 유동장에 의해 이동한 후, 다시 8000에서 16000까지는 시계방향으로 회전하는 일

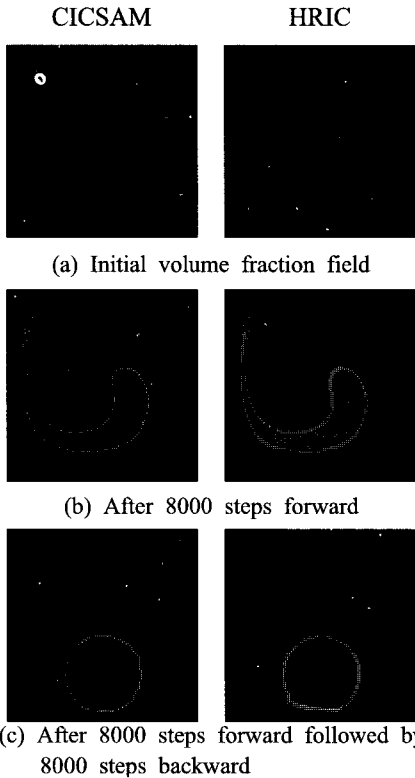


Fig. 3 Results of shearing flow test

정한 유동장에 의해 다시 초기상태로 복귀한 후의 결과를 나타낸다. 결과를 보면 CICSAM 도식을 적용하였을 경우는 거의 눈으로 큰 차이를 확인할 수 없을 정도로 초기조건과 회기한 결과가 거의 일치하게 나타남을 확인할 수 있다. 이에 반해 HRIC 도식을 적용하였을 경우는 수치적 확산에 의해 원의 중심을 기준으로 왼쪽 아래편에 회기한 결과에서 초기조건과는 다소 차이를 나타내는 결과를 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 CICSAM 도식이 정확성 및 타당성(경계면의 비물리적인 변형 및 수치확산이 적음) 면에서 HRIC 도식보다 우수함을 알 수 있다.

3.3 바닥에 장애물이 존재하는 댐붕괴

Fig. 4는 Koshizuka et al.<sup>(9)</sup>의 실험조건과 같은 형태로 수조의 바닥면에 장애물이 설치되어 있는 경우의 댐붕괴(dam-break) 문제를 나타낸다. 이와 같이 장애물이 존재하는 댐붕괴 문제는 자유수면의 변형이 상당히 복잡하게 발생하는 경우로 자유표면의 분리 및 혼합이 복합적으로 크게 발생

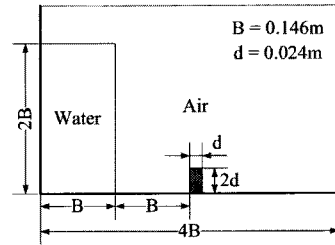


Fig. 4 Geometry of collapsing water experiment with an obstacle

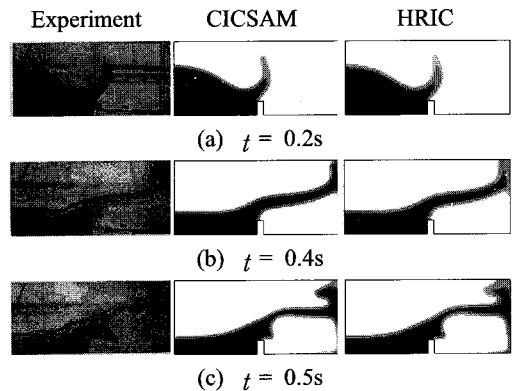


Fig. 5 Comparison of experimental visualization and present numerical results of a collapsing water problem with an obstacle

한다. 수치계산영역의 전체크기는  $4B \times 4B$ 이고, 수치계산을 위해 사용된 격자수는 비정렬 사각형 격자계로 6400( $80 \times 80$ )개이다.

Fig. 5는 3가지 시각( $t = 0.2\text{s}, 0.4\text{s}, 0.5\text{s}$ )에 대한 Koshizuka et al.<sup>(9)</sup>의 실험에 의한 사진과 각각의 도식을 사용한 수치해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 본 수치해석결과와는 두 도식 모두 실험을 통한 유동형태와 극소적인 차이를 나타내고 있지만, 전체적인 유동형태나, 0.4s 이후에 장애물 후면부에 발생하게 되는 물로 포위된 공기주머니의 크기나 그 형태를 적절하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 다만, 예측된 경계면을 기점으로 경계면포착법이 가지고 있는 단점인 변점현상이 미세하지만 나타나고 있으나, 이 경우에도 앞의 Translation 및 Shearing flow 테스트에서 나타난 것과 같이 CICSAM 도식을 사용한 경우가 HRIC 도식을 사용한 경우보다 변점현상이 적게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 경계면포착법에서 문제가 되는 번짐과 수치확산 문제를 개선하기 위해 제안된 HR 도식인 CICSAM<sup>(3)</sup> 및 HRIC<sup>(4)</sup> 방법에 관해 비정렬격자계에 적합한 수치해석방법 면에서 간략하게 살펴보았다. 그리고 수치해석방법의 검증을 위해 널리 활용되고 있는 2차원 Translation test<sup>(7)</sup> 및 Shearing flow test<sup>(2,8)</sup>에 대해 두 도식에 따른 계산결과들을 서로 비교함으로써 각 방법의 정확성과 타당성을 확인하였다. 또한 Myong and Kim<sup>(5)</sup>이 자유표면 유동해석을 위해 개발한 해석코드 (PowerCFD)의 수치해석방법상 견고함을 확인하기 위해 바닥면에 장애물이 존재하는 댐붕괴 문제에 대한 두 도식의 수치계산결과들을 실험결과들<sup>(9)</sup>과 비교·고찰하였다. 연구결과, CICSAM 도식이 상용 CFD 코드에 도입된 HRIC 도식보다 정확성 및 타당성 면에서 우수한 것으로 나타났다. 또한 경계면포착법을 채용한 본 수치해석방법은 간단한 자유표면 유동문제뿐만 아니라 자유표면의 분리와 혼합이 크게 발생하는 다소 복잡한 문제에 이르기까지 실제현상을 적절하게 예측할 수 있음이 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 2007년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구이다.

#### 참고문헌

- (1) Hirt, C. W. and Nicholls, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (2) Rider, W. J. and Kothe, D. B., 1998, "Reconstruction Volume Tracking," *J. Comput. Phys.*, Vol. 141, pp. 112~152.
- (3) Muzaferija, S. and Peric, M., 1999, "Computation of Free Surface Flows using Interface Tracking and Interface Capturing Methods," Chap. 2, in Mahrenholtz, O. and Markewicz, M., *Nonlinear Water Wave Interaction*, Comput. Mech. Publications.
- (4) Ubbink, O., 1997, "Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interface," *PhD Thesis*, University of London.
- (5) Myong, H. K. and Kim, J., 2005, "Development of 3D Flow Analysis Code using Unstructured Grid System(1st Report, Numerical Method)," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 9, pp. 1049~1056.
- (6) Myong, H. K. and Kim, J. E., 2006, "A Study on an Interface Capturing Method Applicable to Unstructured Meshes for the Analysis of Free Surface Flow," *KSCFE J. of Computational Fluids Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 14~19.
- (7) Rudman, M., 1997, "Volume-Tracking Methods for Interfacial Flow Calculations," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 24, pp. 671~691.
- (8) Lopez, J., Hernandez, J., Gomez, P. and Faura, F., 2004, "A Volume of Fluid Method Based on Multidimensional Advection and Spline Interface Reconstruction," *J. Comput. Phys.*, Vol. 195, pp. 718~742.
- (9) Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y., 1995, "A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation," *Comput. fluid Dynamics J.*, Vol. 4, No. 1, pp. 29~46.
- (10) Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method," Harlow: Longman Scientific and Technical.
- (11) Leonard, B. P., 1991, "The ULTIMATE Conservative Difference Scheme Applied to Unsteady One-Dimensional Advection," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 88, No. 1, pp. 17~74.
- (12) Gaskell, H. and Lau, A. K. C., 1988, "Curvature-Compensated Convective Transport: SMART, a New Boundedness Preserving Transport Algorithm," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 8, pp. 617~641.