



개선된 격자기반 적합 표면입자법을 이용한 자유표면유동 수치해석

신영섭[†]
한라대학교 스마트모빌리티공학부

Numerical Analysis of Free-Surface Flows Using Improved Adaptable Surface Particle Method Based on Grid System

Young-Seop Shin[†]
School of Smart Mobility Engineering, Halla University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, the method of determining the state of grid points in the adaptable surface particle method based on grid system developed as a free-surface tracing method was improved. The adaptable surface particle method is a method of determining the state of the grid point according to the shape of the free-surface and obtaining the intersection of the given free-surface and grid line where the state of the grid point changes. It is difficult to determine the state of grid points in the event of rapid flow, such as collision or separation of free-surfaces, and this study suggests a method for determining the state of current grid points using the state of surrounding grid points where the state of grid point are known. A grid layer value was assigned sequentially to a grid away from the free-surface, centering on the boundary cell where the free-surface exists, to identify the connection information that the grid was separated from the free-surface, and to determine the state of the grid point sequentially from a grid away from the free-surface to a grid close to the free-surface. To verify the improved method, a numerical analysis was made on the problem of dam break in which a sudden collision of free-surface occurred and the results were compared, and the results were relatively reasonable.

Keywords : Adaptable surface particle method(적합 표면입자법), Free-surface(자유표면), Dam break(댐붕괴)

1. 서론

자유표면 수치해석법은 VOF(Volume of Fraction) 및 LS(level set) 방법과 같은 오일러 관점에서의 자유표면 포착법(capturing method)과 MAC(Marker and Cell) 또는 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)와 같은 라그랑제 관점에서의 자유표면 추적법(tracking method)으로 구분되는데 최근에는 자유표면 포착법과 추적법을 동시에 사용하여 자유표면을 보다 정밀하게 추적하려는 연구가 시도된 바 있다. 자유표면 추적법과 VOF 방법의 연결(Aulisa et al., 2003) 또는 LS 방법과의 연결(Ianniello & Mascio, 2010)에서와 같이 각각의 장점을 살려 질량 보존 및 급격한 형상 변화를 보다 정밀하게 수치해석할 수 있음을 보여준 바 있다.

본 연구에서는 자유표면 추적법과 격자 구조를 이용하는 포착법의 장점을 살려 자유표면의 형상을 추적하고자 한다. 본 연구에서 제시한 격자기반 적합 표면입자법은 자유표면 추적법으로 개발한 방법이다. 자유표면 추적법 사용시 입자들의 과도한 집중 또는 확산이 나타나게 되는데 본 연구에서는 격자 구조를 이용하여 입자들의 재배치를 시도함으로써 이를 방지하였다.

격자 구조 이용 방법은 입자와 격자계의 연결(Aulisa et al., 2004)을 시도한 SM(Surface Marker) 방법에 기반하였다. SM 방법에서는 Fig. 1에서와 같이 □ 기호로 도시한 고정입자들의 연결을 통해 자유표면을 표현하였다. 자유표면 형상 변화에 따라 고정점 입자의 위치가 변화하면 고정점 입자 사이에 격자면(face of cell)이 존재하는 경우에는 격자면과의 교차점을 ▷로 도시한 교차점 입자를 추가하고 ×로 도시한 면적 보존 입자를

격자 내에 추가로 배치함으로써 질량 보존을 만족시키는 새로운 자유표면 형상이 이루어지도록 하였다. 고정점 입자는 곡선의 연결 상태를 파악하기 위하여 사용되는 입자로 시간 진행에 따라 새로이 추가되거나 제거되지 않는 입자이며 고정점 입자 사이에 위치하는 교차점 입자와 면적 보존 입자는 자유표면 변화에 따라 새로이 추가되거나 제거될 수 있는 입자를 의미한다.

자유표면은 고정점 입자로 연결된 곡선으로 표현되므로 고정점 입자의 연결 정보가 매우 중요하다. Fig. 2와 같이 자유표면의 충돌 또는 분리와 같은 급격한 유동 변화 경우에는 곡선들이 서로 교차하는 상태가 발생하게 된다. 이 경우 새로운 자유표면을 구성하기 위해서는 고정점 입자의 추가 또는 제거된 새로운 형태의 고정점 연결 상태를 구성해야 하는 어려움이 발생하게 된다. 특히 3차원 경우에는 여러개의 곡선들이 복잡하게 교차하는 경우가 발생하게 되어 수치해석 진행이 사실상 불가능하게 된다.

이러한 어려움을 극복하기 위하여 격자기반 적합 표면입자법(adaptable surface particle method)을 제시 (Shin, 2017)한 바 있다. 이 때, 자유표면 구성은 2차원 경우에는 직선 조각들의 합으로 3차원 경우에는 삼각형 또는 사각형 조각들의 합으로 표현하는데 각각의 절점은 고정점 입자가 아닌 자유표면 형상 변화에 따라 추가되거나 제거될 수 있는 교차점 입자로 구성하였다. Fig. 3의 왼쪽에 주어진 자유표면으로부터 직선 조각들로 이루어진

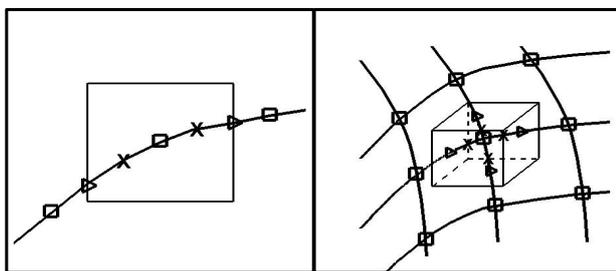


Fig. 1 Surface markers in 2D and 3D

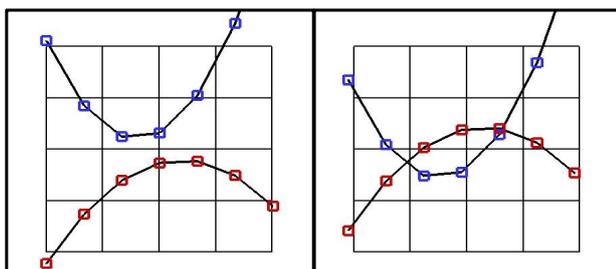


Fig. 2 Collision of surfaces in surface marker method

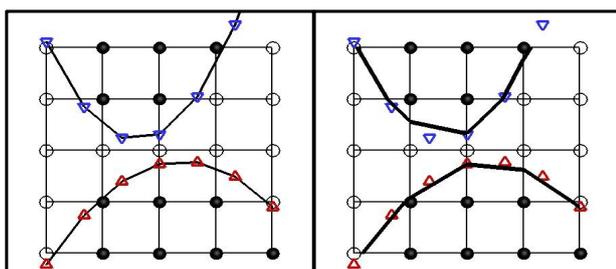


Fig. 3 Node state in surface particle method

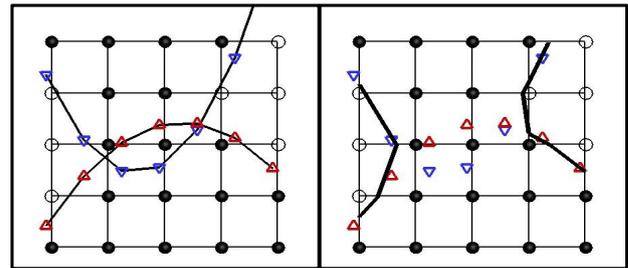


Fig. 4 Collision of surfaces in surface particle method

자유표면과 격자선(edge of cell)의 교점인 교차점 입자의 위치를 구할 수 있으며 교차점 입자들을 연결하여 새로이 구성된 자유표면을 오른쪽에 나타내었으며 격자점의 상태(node state)를 유체영역은 ●로 공기 영역은 ○로 도시하였다. 교차점 입자는 격자점의 상태가 바뀌는 격자선(edge of cell)에 존재하며 왼쪽에 주어진 자유표면과 격자선의 교차점으로부터 구하게 된다. 교차점 입자는 격자점의 상태가 결정되면 격자점의 상태가 변화하는 격자선에서 격자선과 자유표면을 구성하는 각각의 조각의 교점으로 결정되므로 S.M. 방법에서와 같이 각각의 조각들의 연결 상태에 대한 정보가 없어도 구할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 왼쪽에 자유표면이 충돌하는 경우 오른쪽에 격자점의 상태로부터 새로이 구성된 자유표면을 도시하였다. Fig. 4에서와 같이 격자점의 상태가 파악되면 격자선과 주어진 자유표면의 교점을 구함으로써 새로운 자유표면을 형성할 수 있음을 알 수 있다.

개발된 적합 표면입자법을 이용하여 슬로싱, 댐 붕괴 문제에 대한 수치해석을 하였고 기존 결과와의 비교를 통해 개발된 방법의 타당성을 입증한 바 있다. 하지만, Fig. 4에서와 같이 자유표면의 충돌 또는 분리와 같은 급격한 유동 현상을 동반하는 경우 격자점의 상태 파악이 쉽지 않다는 점도 지적된 바 있다 (Shin, 2017).

본 연구에서는 자유표면의 충돌 또는 분리 경우에도 교차점의 상태를 쉽게 파악할 수 있는 개선된 적합 표면입자법을 제시하였다. “4장의 개선된 격자기반 적합 표면입자법”에서와 같이 자유표면의 형상 변화가 이루어지는 매 시간 단계에서 교차점의 상태는 자유표면 부근에 가까이 있는 격자점에서 변화가 발생하며 자유표면으로부터 멀리 떨어져있는 격자점은 교차점의 상태가 변화하지 않는 것을 이용하여 자유표면에서부터 멀리 떨어진 격자점으로부터 자유표면에 가까운 격자점까지 순차적으로 교차점의 상태를 파악하였다. 이것은 현 격자점의 상태를 결정하는데 상태가 알려져 있는 주변 격자점의 정보를 이용한다는 것을 의미한다.

본 연구에서 제시한 개선된 방법의 검증을 위하여 자유표면의 충돌이 발생하는 가장 급격한 댐 붕괴 유동에 대하여 수치해석을 수행하고, 기존 결과와의 비교를 통해 타당한 결과를 확인할 수 있었다.

2. 지배방정식

비압축성 유동을 가정하면 무차원화된 연속방정식 및 지배방

정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + uu_x + vv_y + ww_z = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R} \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + uv_x + vv_y + ww_z = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R} \nabla^2 v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + uw_x + vw_y + ww_z = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{R} \nabla^2 w - \frac{1}{F_n^2}$$

여기서, 속도 (u,v,w)는 특성속도 U로 (x,y,z)는 특성길이 L로 t는 L/U로 p는 ρU^2 으로 무차원화 되었고, R은 UL/ν 를 F_n 은 $U/(gL)^{1/2}$ 을 의미하며 ν 는 유체의 동점성계수 g는 중력가속도를 의미한다. 자유표면상에서 대기압 조건을 사용하였고 이산화 과정에서 차분 방법은 FDM 및 FVM 방법을 혼용하여 사용하였으며 확산항은 중심차분법을 대류항은 상류차분법을 이용하였다. 한편 유체의 충돌같은 급격한 유동 계산시 매우 작은 시간 간격이 사용되므로 시간 전진은 Runge-Kutta 1차인 Euler 방법을 사용하였다.

3. 격자기반 적합 표면입자법

격자기반 적합 표면입자법은 입자 추적법으로 제시된 S.M. 방법(Aulisa et al., 2004)이 자유표면의 충돌 및 분리가 발생하는 급격한 유동에 적용하기 어렵다는 단점을 극복하기 위한 방법으로 제시된 바 있다 (Shin, 2017).

격자기반 적합 표면입자법은 Fig. 5(a)와 같이 2개의 직선으로 구성된 자유표면이 주어진 경우 식 (3)에서와 같이 ϕ 의 부호에 따라 각 격자점에서의 상태를 공기상태(air state) 및 액체상태(fluid state)로 정의한다. ϕ 의 값이 양수인 경우는 공기상태, 음수인 경우에는 액체 상태를 의미한다.

$$\phi = (\vec{x}_N - \vec{x}_F) \cdot \vec{n}_F \quad (3)$$

여기서 벡터 x_N 은 격자점의 위치이며 x_F 는 격자점에서 자유표면 법선 방향의 직선과 자유표면과의 교점 위치이고 n_F 는 자유표면의 법선 벡터를 의미하는데 액체 영역에서 공기 영역으로 향하는 방향의 벡터이다.

Fig. 5(a)에 격자점 상태에 따라 자유표면 상단 공기 영역에 존재하는 격자점은 ○로 자유표면 하단 액체 영역의 격자점은 ● 기호로 도시하였다.

격자점 상태에 따라 교차점 입자(intersection particle)는 격자점의 상태가 바뀌는 격자선(edge) 상에 위치하는 것으로 정의하여 Fig. 5(b)에 ▷ 기호로 도시하였다. Fig. 5(b)에서와 같이 새로이 구성된 자유표면은 각각의 교차점 입자를 절점으로 하는 직선들의 집합으로 이루어지며 각각의 직선은 격자 내에

포함되는 것을 알 수 있다. 이를 통해, Fig. 5(b)에 도시한 바와 같이 새롭게 생성된 교차점 입자로부터 각각의 직선들의 법선 벡터를 구할 수 있다.

3차원 격자계에 대해 식 (3)에 보인 격자점의 상태를 결정하는 방법을 살펴보면 먼저 격자점에서 가장 가까운 교차점 입자를 찾고 Fig. 6에서와 같이 가장 가까운 교차점 입자를 포함하는 자유표면 조각 즉 표면입자(surface particle)들로부터 격자점에서 가장 거리가 가까운 최적의 표면입자를 선택한다. Fig. 6의 왼쪽에는 격자점을 + 기호로 도시하였고 가장 가까운 교차점 입자에 4개의 삼각형으로 이루어진 표면입자들을 도시하였다. 4개의 삼각형 표면입자들의 평균 법선 벡터 방향으로 투영한 국부 좌표계에서 격자점과 4개의 표면입자들을 Fig. 6의 오른쪽에 도시하였고 이로부터 격자점에서 가장 가까운 표면입자를 선택할 수 있으며 식 (3)의 판정식을 이용하여 격자점의 상태를 결정한다.

Fig. 5에서와 같이 교차점 격자로 이루어진 표면입자들이 구성되면 다음 시간 단계에서에서의 교차점 위치는 식 (4)와 같이 n 시간 단계에서 교차점 입자의 속도를 이용하여 n+1 시간 단계에서의 새로운 위치를 구한다. 새롭게 변화된 자유표면 형상으로부터 Fig. 5에서와 같이 새로운 교차점 격자를 구하여 n+1 시간 단계에서의 자유표면 형상을 2차원에서는 격자 내의 직선으로 3차원에서는 격자 내의 삼각형 또는 사각형들의 집합으로 재구성한다.

$$\frac{d\vec{x}_F}{dt} = \vec{V}_F \quad (4)$$

여기서 벡터 x_F 는 교차점 입자의 위치 V_F 는 교차점 입자의 속도를 의미한다.

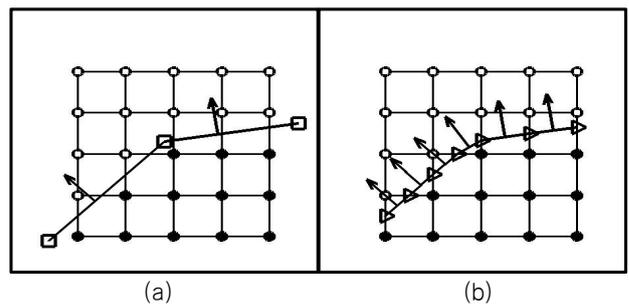


Fig. 5 State of nodes and intersection particle

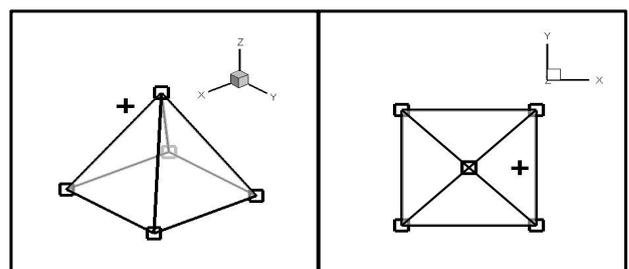


Fig. 6 Nearest surface particle

4. 개선된 격자기반 적합 표면입자법

앞 장에서 시간 전진에 따른 $n + 1$ 시간 단계에서 새로운 표면입자를 구성하기 위해서는 n 시간 단계에서의 표면입자로 구성된 자유표면 형상으로부터 격자점의 상태를 판정한 후 격자점의 상태가 바뀌는 격자선에서 격자선과 표면입자와의 교점 즉 교차점 입자를 계산해야 함을 기술하였다. 그러나 급격한 유동의 경우에는 격자점에 가까운 거리에 있는 표면격자들이 매우 복잡한 형태로 구성되어 격자점의 상태를 파악하기가 매우 어렵게 된다. Fig. 7에는 격자점 부근의 자유표면이 지그재그 형태로 구성된 표면격자들을 도시하였다. Fig. 6에서 제시한 방법을 이용하여 주변의 삼각형 표면입자들의 평균 법선 벡터 방향으로 투영한 국부 좌표계에서 보면 격자점이 2개의 삼각형 안에 포함되어 있으며 2개의 삼각형은 서로 법선 벡터 방향이 반대이므로 선택된 삼각형에 따라 교차점의 상태가 상반되는 결과를 줄 수 있어 Fig. 6에서 제시한 투영면을 이용한 방법으로는 격자점의 상태 파악을 할 수 없게 된다.

한편 Fig. 8에는 2개의 자유표면이 충돌하는 경우를 도시하였다. 오른쪽에 \blacksquare 로 도시한 격자점의 상태를 격자점에서 가까운 자유표면을 이용하여 식 (3)을 적용하면 격자점의 상태가 공기 상태로 계산되는 오류가 발생하게 되어 이 경우에도 격자점의 상태를 파악 할 수 없게 된다.

Fig. 7 및 Fig. 8에서와 같은 복잡한 자유표면 형상 또는 자유표면 충돌같은 경우에는 식 (4)를 이용하여 격자점의 상태를 판단하는 경우 오류가 발생할 수 있어 이에 대한 보완 방법이 필요함을 알 수 있다.

시간 전진 단계에서 자유표면의 형상 변화를 살펴보면 자유표면에 가까이 있는 격자점에서 격자점 상태 변화가 발생할 수

있으나 자유표면으로부터 멀리 떨어진 격자점은 교차점의 상태가 변화하지 않는다는 것을 알 수 있는데 본 연구에서는 자유표면으로부터 멀리 떨어진 격자점으로부터 자유표면에 가까운 격자점 방향으로 순차적으로 교차점의 상태를 파악하는 방법을 제시하고자 한다.

Fig. 9(a)에서와 같이 자유표면이 주어진 경우 자유표면을 포함하는 격자 즉 경계셀 격자를 레이어 1로 값을 부여하고 레이어 1에 연결된 격자들을 레이어 2로 순차적으로 번호를 부여하면 Fig. 9(d)에서와 같이 전체 격자를 레이어 값으로 구분할 수 있다. 이 때, 레이어 값이 커질수록 자유표면에서 멀리 떨어진 격자임을 의미한다. 미소시간 간격으로 시간 전진하는 단계에서는 자유표면에서 멀리 떨어져 있는 격자점의 상태는 변화가 없으므로 레이어 값이 큰 격자로부터 레이어 값이 작은 격자로 순차적으로 격자점의 상태를 파악하면 경계셀을 만나기 전까지는 시간단계 동안 격자점의 상태가 변화하지 않으므로 격자점 상태값이 유지된다. 한편 레이어 1 즉 자유표면을 포함하는 경계셀에서의 격자점의 상태는 경계셀의 격자선에 자유표면이 존재하는 경우 자유표면을 기준으로 격자점의 상태가 서로 반대가 되도록 한다.

제시한 방법을 Fig. 7에 적용하면 +로 도시한 격자점에서 z 축 하단 즉 자유표면으로부터 멀리 떨어진 격자점의 상태가 액체 상태라면 레이어 값이 큰 값에서 작은 값까지 순차적으로 연결된 격자들을 따라 +로 도시한 격자점 사이에 경계셀이 존재하지 않는다. 그러므로 +로 도시한 격자점의 상태도 액체 상태로 판정되며 오류가 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10의 왼쪽에는 2개의 자유표면이 충돌하는 경우를 도시하였으며 오른쪽에는 Fig. 3에서와 같이 직선 조각들로 이루어진 자유표면과 격자선의 교점인 교차점 입자들의 위치를 구하여 새로이 구성된 자유표면을 나타내었다. Fig. 10에서와 같이

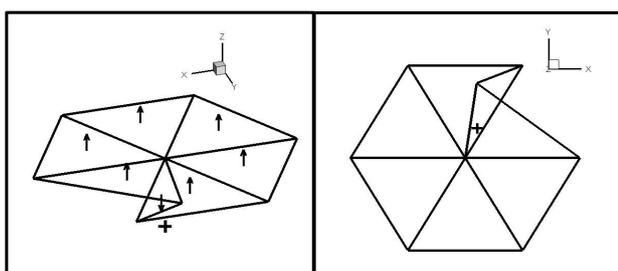


Fig. 7 Overlapped surface particles

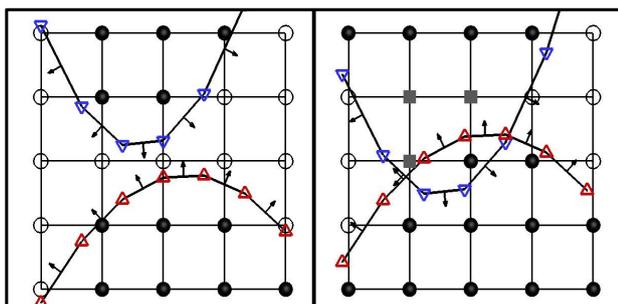
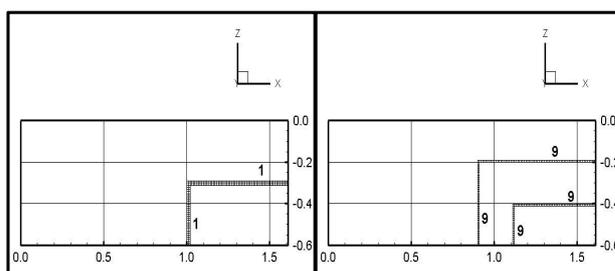
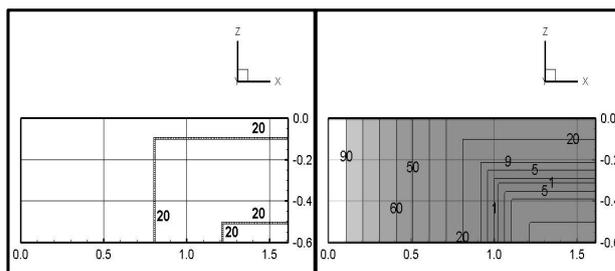


Fig. 8 Collision of free surfaces



(a) (b)



(c) (d)

Fig. 9 Layer 1,9,20 and layer contour

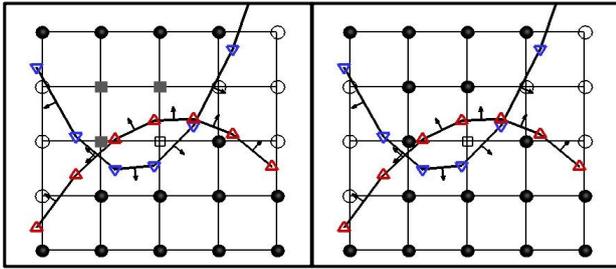


Fig. 10 Collision of free surfaces

2개의 자유표면이 충돌하는 경우 \blacksquare 로 도시한 격자점의 상태를 보면 레이어 값이 큰 격자점에서 \bullet 로 표현된 액체 상태가 먼저 판정되고 \bullet 와 \blacksquare 로 도시된 격자점 사이에 자유표면이 존재하지 않으므로 \blacksquare 로 도시한 격자점의 상태도 액체 상태로 판정되어 오류가 발생하지 않게 된다.

한편 2개의 자유표면 사이에 있는 \square 로 도시한 격자점의 상태는 오른쪽에 도시한 바와 같이 격자선에 액체 상태의 격자점이 존재하고 격자선에 자유표면이 존재한다. 하지만, 격자점의 상태가 액체 상태에서 공기 상태로 변화하여야 하나 주어진 자유표면의 법선 벡터 방향을 보면 식 (3)에 따라 액체 상태로 판정되어야 하는 상호 불일치가 발생함을 알 수 있다. 이러한 불일치가 발생하는 격자점에서는 격자선에 자유표면이 존재하는 경우에도 격자점의 상태를 변화시키지 않고 액체 상태로 격자점의 상태를 결정한다. 순차적 레이어 연결 방식에 의한 판단과 식 (3)에 따른 법선 벡터 판정 방식의 불일치가 발생한다는 것은 액체의 충돌로 인하여 미소 시간 간격에서 새로운 자유표면이 격자점에 근접하였음을 의미하고 \square 로 도시한 격자점의 상태는 액체 상태에 새로운 액체가 추가적으로 중첩되고 있음을 의미한다.

레이어 연결에 따른 격자점의 상태 결정 방법은 식 (3)과 함께 주변 격자점 상태를 함께 이용함을 의미하며 식 (3)에 추가적인 판단 방법을 제공한다는 것을 의미한다. 즉 레이어 값이 큰 주변 격자점의 상태에 대한 정보를 추가적으로 이용하여 주어진 격자점의 상태를 판단함을 의미한다. 제시한 레이어 연결 방식에 따른 격자점 상태 결정 방법을 정리하면 다음과 같다.

첫째 자유표면을 포함하는 경계셀에 레이어 값을 1로 부여한다.

둘째 레이어 1로부터 격자의 연결 상태에 따라 격자에 레이어 값을 증가시켜 부여한다.

셋째 레이어 값이 큰 격자로부터 작은 격자로 순차적으로 격자점의 상태를 판정한다.

넷째 경계셀에서는 격자선에 자유표면의 유무에 따라 격자점의 상태가 변화하나 법선 벡터 판정 방법과 상반되는 결과가 발생시에는 격자점의 상태가 변화하지 않도록 한다.

한편 개선된 격자기반 적합 표면입자법에서 자유표면 처리 소요 시간은 매 시간 단계에서 전체 소요 시간의 60%를 보이고 있는데 이는 모든 격자점에서 격자 상태를 판정하는 데에 따른 이유이다. 매시간 단계에서 자유표면 형상 변화는 자유표면을 포함하는 경계셀 격자 중심으로 1~2 레이어 내에서 이루어지므로 격자점 판정은 자유표면을 포함하는 경계셀 격자 중심으로

3~4 레이어 이내로 충분하며 이 경우 대부분의 격자점을 판정할 필요가 없게 되며 소요시간을 대폭 단축시킬 수 있다.

5. 자유표면 수치해석

슬로싱 및 댐 붕괴 문제에 대한 수치해석 및 결과 비교를 통하여 격자기반 적합 표면입자법의 타당성을 확인(Shin, 2017)한 바 있으므로, 본 연구에서는 새로이 개선된 방법의 검증에 위하여 액체 충돌이 발생하는 급격한 댐 붕괴에 대한 수치해석을 재수행하였다.

계산 조건은 Fig. 11에서와 같이 길이(L) 1.61m, 폭(B) 0.15m, 높이(H) 0.6m의 수조에 길이 0.6m, 높이 0.3m의 물이 채워진 경우이다. 격자는 수직 및 수평 방향으로 60x161로 등간격 분할하였으며 이 때 격자 크기 Δs 는 0.01m이다. 시간 간격은 유동 안정성을 고려하여 0.001~0.002 sec 범위내에서 가변하여 사용하였다. 한편 계산 알고리즘의 3차원으로의 확장성을 용이하게 하기 위하여 육면체로 이루어진 3차원 격자를 이용하였고 2차원 유동을 모사하기 위하여 수조의 폭 방향으로는 물리량 및 물리량의 미분이 일정하다는 조건을 적용하였다.

Fig. 11에는 댐 붕괴시 시간 진행에 따른 자유표면 형상 변화 과정에 대한 실험 결과 (Lobovsky et al., 2014)를 도시하였으며 Fig. 12에는 수치해석 결과를 도시하였다. 제한된 격자 크기로 실험에서와 같은 작은 물방울 들의 발생까지는 표현할 수 없으나 왼쪽 벽면으로 물의 상승 과정과 이후 왼쪽 벽면에서의 발달 과정을 거쳐 물의 충돌 과정까지 유사한 시간대에 유사한 패턴으로 자유표면의 형상 변화가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 방법이 이러한 유체 충돌 경우에도 잘 적용될 수 있음을 알 수 있다.

한편 수치해석된 압력값 검증을 위하여 실험에서 계측된 충격력 결과 (Lobovsky et al., 2014)와 비교하였다. 충격력 계측 위치는 왼쪽 벽면에 수조의 바닥으로부터 0.003, 0.015, 0.030, 0.080m에 부착된 센서를 통해 계측된 값이며 Fig. 13에서와 같이 sensor 1~4로 표현하였다. 한편 센서 2L은 3차원 효과가 발생하는 가를 살펴보기 위하여 센서 2와 같은 높이에 위치해 있으나 수조의 폭 방향으로 0.0375m 떨어진 곳에 설치하였는데 Fig. 13에서와 같이 센서 2에서 계측된 값과 동일한 값을 주고 있어 3차원 효과는 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

충격력 계산시에는 Fig. 12에서 사용한 격자 크기와 시간 간격으로는 충격력 재현이 불충분하여 충격이 발생하는 왼쪽 벽면 부근의 제한된 영역에서 격자 크기를 수직 및 수평 방향 모두 1/4로 감소시켰다. 이 때, Δs 는 0.0025m이다. 이후로는 일정 비율로 점차로 증가시켜 Fig. 12에 사용한 격자 크기 0.01m가 되도록 하였으며 사용된 격자수는 180x220이다. 격자 크기의 감소에 따라 시간 간격도 유동 안정성을 고려하여 0.00025~0.00125 sec로 가변시켰다. 한편 격자가 모멸해지면서 왼쪽 벽면에 물이 상승하는 시간대에 격자 크기 정도의 고주파 패턴(zigzag pattern)이 자유표면 상에 나타난다. 그리고 이

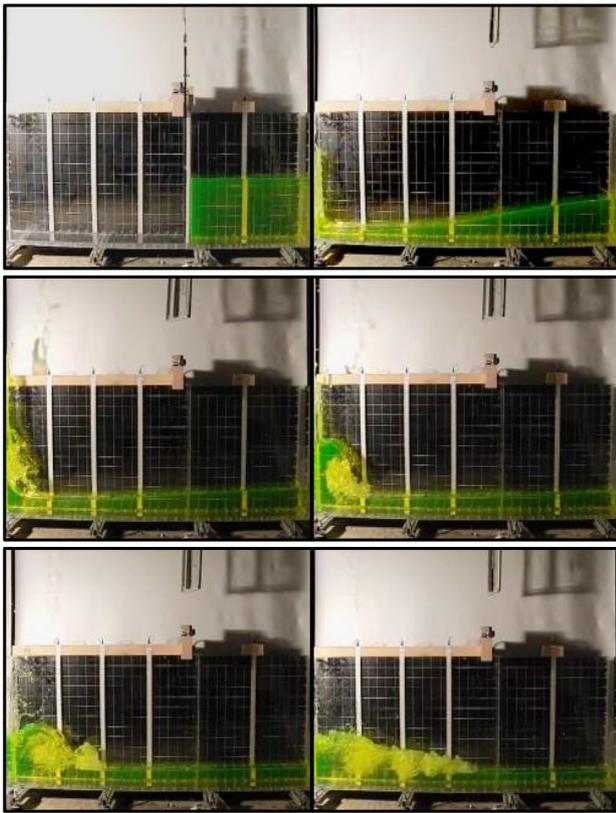


Fig. 11 Evolution of free surfaces at $t=0.$, 0.573, 0.862, 1.023, 1.166, 1.320 sec.

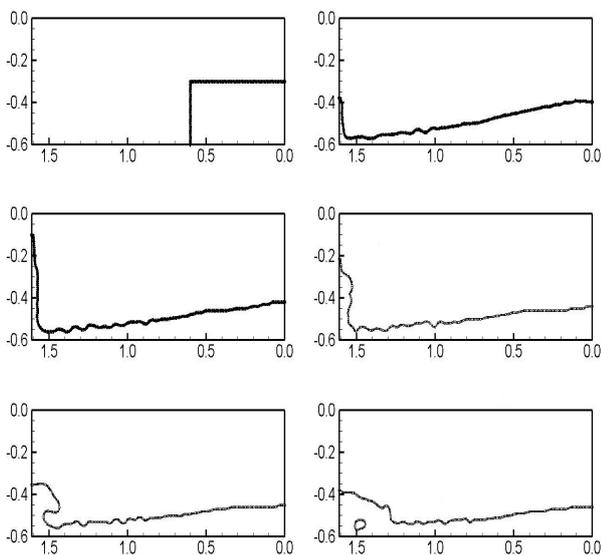


Fig. 12 Evolution of free surfaces at $t=0.$, 0.6, 0.85, 1.0, 1.15, 1.3 sec.

패턴이 발전하면서 유동이 점차 불안정(unstable)하게 되어 더 이상의 수치해석을 진행할 수 없게 되는 상황이 발생하였다. 보다 작은 시간 간격을 사용하여도 고주파 패턴 발생 및 유동 불안정 현상은 여전히 발생하였다. 본 연구에서는 이를 방지하기 위하여 왼쪽 벽면에 물이 충돌하는 시간 이후로는 식 (5)와 같이

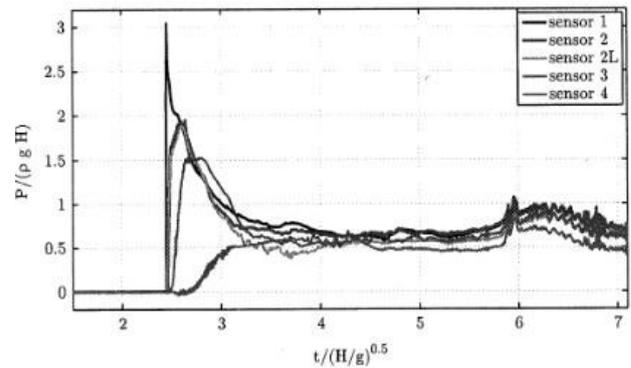


Fig. 13 Impact pressure signals from pressure sensors

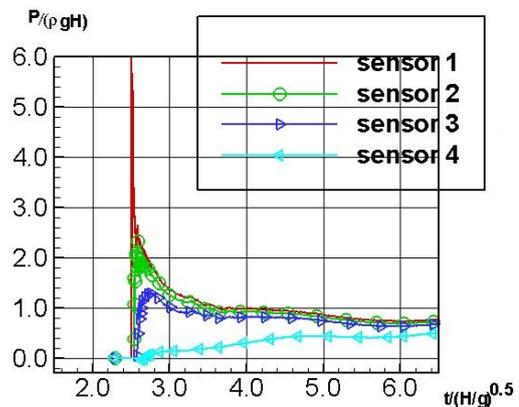


Fig. 14 Numerical results of impact pressure

속도 및 자유표면의 변위를 완하시키는 방법을 적용하였다. 벡터 Z_p 는 수치해석된 값이며 Z_s 는 Z_p 인접한 격자들의 물리량 평균값을 의미하며 α 는 완화계수로서 자유표면 변위 계산시에는 1.0을 속도 계산시에는 0.1을 적용하여 주어진 위치의 물리량이 인접한 값에 비해 과도하게 계산되는 것을 방지한다.

$$\vec{Z} = (1 - \alpha) \vec{Z}_p + \alpha \vec{Z}_s \quad (5)$$

Fig. 14에는 부착된 센서와 동일 위치에서의 수치해석 결과를 보이고 있다. 국부적으로는 다소의 차이가 있으나 충격력이 발생하는 시점과 sensor 1에서 가장 큰 충격력이 발생하며 sensor 2와 3의 경향에서 보는 바와 같이 최대 압력이 발생하는 부근에서의 압력의 증가 및 감소하는 패턴이 비교적 유사함을 알 수 있다. 또한, 충격력의 최대값 면에서도 비교적 타당한 값을 보여주고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

개선된 격자기반 적합 표면입자법의 검증을 위하여 실험 결과가 알려져 있는 댐 붕괴 문제에 대하여 수치해석을 진행하였다. 실험 결과와의 비교를 통해 타당한 결과를 제공함을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 시도한 개선된 알고리즘이 자유표면의 충돌 및 분리 과정에 잘 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

앞으로 다양한 자유표면 유동에 대한 수치해석을 통하여 수치기법의 정밀화를 향상시키는 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다. 이와 더불어, 본 기법은 3차원 또는 비정렬격자계에서도 적용 가능한 방법으로 다양한 격자계에서의 수치해석도 함께 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- Aulisa, E., Manservigi, S. & Scardovelli, R., 2003, A mixed markers and volume of fluid method for the reconstruction and advection of interfaces in two phase and free boundary flows. *Journal of Computational Physics*, 188, pp.611–639.
- Aulisa, E., Manservigi, S. & Scardovelli, R., 2004, A surface marker algorithm coupled to an area-preserving redistribution method for 3D interface tracking. *Journal of Computational Physics*, 197, pp.555–584.
- Ianniello, S., & Di Mascio, A., 2010, A self-adaptive oriented particle level-set method for tracking interfaces. *Journal of Computational Physics*, 229, pp.1353–1380.

Lobovsky, L. et al., 2014, Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break. *Journal of Fluids and Structures*, 48, pp.407–434.

Shin, Y.S., 2017, Numerical analysis of free surface flows using adaptable surface particle method based on grid system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54, pp. 26–33.



신 영 섭