

## 레블셀 기법을 이용한 자유수면의 모의 Modeling of Free Surface by the Level Set Method

이해균

단국대학교 (천안캠퍼스) 토목환경공학과

Haegyun Lee

Dankook Univ. (Cheonan Campus) Dept. of  
Civil and Environmental Engrg.

### 요약

수리학에서 다루는 유체 현상은 물과 공기의 경계면인 자유수면을 포함할 때가 많다. 수표면의 곡률이 작은 경우에는 정수압 가정이 적절하지만, 그렇지 않은 경우에는 비정수압 분포를 고려하여야 한다. 이와 같은 문제에서는 수심적분된 천수방정식이 아닌, 네비어-스토크스 방정식(Navier-Stokes equations)에 의존해야 할 때가 많다. 특성이 다른 두 유체, 예를 들면, 물과 공기, 물과 기름과 같이 섞이지 않는 두 유체의 모의를 위하여 본 연구에서는 레블셀 기법을 적용하였다. 고전적인 문제인 댐파괴 문제에 적용하여 이를 실험결과, 기존 수치모델링 결과와 비교하여 이의 효율성을 확인하였다.

## I. 개요

공학의 여러 분야에서 나타난다.

### 1. 자유수면의 모의

수리학에서 다루는 유체 현상은 물과 공기의 경계면인 자유수면을 포함할 때가 많다. 이를 어떤 방식으로 모의할 것인가를 결정하는 것은 물론 문제의 특성에 따라 다르다. 수심에 비하여 수평방향의 규모가 크고, 수표면의 곡률이 작은 경우에는 정수압 가정이 적절하지만, 그렇지 않은 경우에는 비정수압 분포를 고려하여야 한다. 비정수압 분포가 중요한 문제에서는 대체로 수심적분된 천수방정식이 아닌, 네비어-스토크스 방정식(Navier-Stokes equations)에 의존해야 할 때가 많다.

특성이 다른 두 유체, 예를 들면, 물과 공기, 물과 기름과 같이 섞이지 않는 두 유체의 모의는 매우 어려운 문제로 알려져 왔다. 유체역학에서는 특히 기체와 액체가 혼재된 경우처럼, 상(phase)이 다른 두 유체의 흐름을 이상유동(two-phase flow)이라고 구분하며, 다상유동 (multi-phase flow)의 특별한 예로 분류한다. 자유수면과 같이 경계면을 포함하는 문제는 자연과학 및

### 2. 레블셀 기법

이상유동에 대한 전산유체역학적인 접근방법에서 경계면인 자유수면의 거동을 해석하는 방법으로는, 고전적인 유체역학의 연구 방법 분류와 같이, 크게 오일러식 접근방법(Eulerian approach)과 라그랑지식 접근방법(Lagrangian approach)으로 구분할 수 있다. 라그랑지식 접근방법은 주로 가상적인 유체입자(particle)의 이동에 초점을 맞추고 있다. 최근 많이 사용되고 있는 방법이며, 오일러식 접근방법은 다시 계면추적방법(interface tracking method)과 계면포착방법(interface capturing method) 방법으로 구분할 수 있다. 경계일치 좌표계(body fitted coordinate)를 사용하여 자유수면이 해석을 위한 격자의 경계가 되도록 하는 방법이 계면추적방법에 속하는 반면, VOF(Volume of Fluid)와 본고에서 소개할 레블셀 방법 (Level set method)을 대표적인 계면포착방법으로 분류할 수 있다.

레블셀 (Level set method) 방법은 UCLA의 수학자

인 Stanley Osher와 캘리포니아 대학 버클리의 James Sethian 등에 의하여 1980년대에 제안되었다 (Osher and Sethian, 1988). 그후, 많은 연구자들의 노력에 의하여 영상 이미지 처리, 컴퓨터 그래픽스, 계산 기하학 (computational geometry), 최적화(optimization), 전산유체역학분야(computational fluid dynamics) 등 여러 분야에 응용되어 지금에 이르게 되었다. 사실상 레블셀이라는 말이 낫설 뿐, 영화, 광고 등을 통하여 이미 우리 주위에 가까이 와 있는 셈이다.

레블셀 방법과 VOF 방법은 기체와 액체의 경계면의 모의를 위하여, 확산항이 없는 이송방정식 (advection equation)을 사용한다는 점에서 이전에 사용되어 왔던 방법과 같다. 이는 물과 공기의 경계면과 같이, 섞이지 않는 (immiscible) 두 유체의 모의를 생각한다면 경계면의 번짐(smearing)이 없어야 하기 때문에 당연한 것이다. 다만, VOF 방법에서 이를 수치적자내에서 서로 다른 유체의 부피 구성비(volume fraction)를 나타내는 일종의 지시함수의 이송방정식으로 해석하였고, 레블셀 방법에서는 이를 자유수면에 대한 운동학적(kinematic) 경계조건 적용이라는 관점에서 출발하였을 뿐이다.

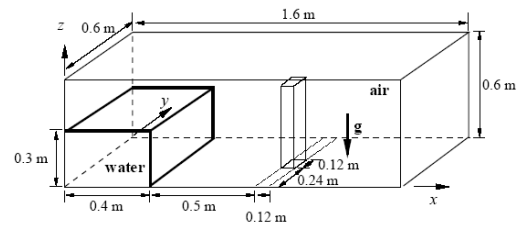
레블셀 방법에서는 이송방정식의 지시함수(레블셀 함수)를 경계면으로 부터 부호가 부여된 최단거리(signed distance)로 정의한다. 즉, 예를 들면, 물과 공기의 경계면에서 물이 있는 영역은 경계면으로 부터의 거리에 양(+)의 부호를, 공기가 있는 영역은 음(-)의 부호를 부여한다. 계산한 속도장에 의하여 이송된 레블셀 함수 값이 경계면으로부터 거리가 되도록 재구성하는 과정을 재초기화(reinitialization) 또는 재거리화(redistancing) 라고 부르며, 각 시간 단계마다 수행하는 것이 보통이다. 대체로 재초기화는 기하학적인 방법을 사용하거나, 전 영역에서 경계면까지 거리 구배가 1이 되도록 편미분방정식을 적용한다.

본 연구에서는 유한요소법 기반의 3차원 Navier-Stokes 방정식 해석코드를 개발하고 이를 레블셀 알고리즘과 결합하였다. 그리고 개발된 모델을 댐-파괴 문제에 적용하였다.

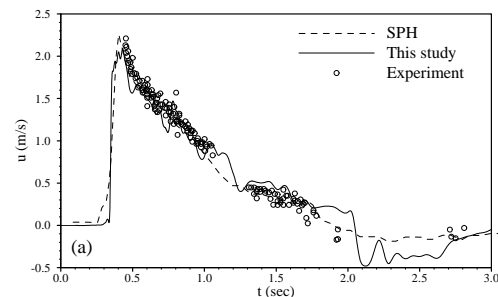
## II. 개발 기법의 적용

### 1. 댐 파괴 - 기둥 문제에서의 적용

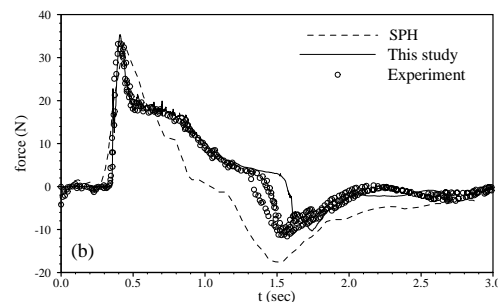
레블셀 기법의 다른 적용 사례(Lee, 2007)로서 정사각형 단면 기둥이 있는 댐 파괴문제(그림 1)를 모의하였다. 초기조건에서 수체를 가두었던 막을 제거함으로써 수체가 기둥에 충격력을 가하고 반대편 벽에 부딪혀 다시 돌아올 때까지를 모의하였다. 그림 2는 기둥 전면에 위치한 관측점에서의 +x방향 유속( $u$ )과 기둥 전체에 작용하는 힘을 계산하여 이를 실험 결과 (Árnason, 2005), 기존의 SPH 모의 (Gómez-Gesteira & Dalrymple, 2003) 등과 비교한 결과이다. 특히 기둥에 작용하는 힘의 경우에, 레블셀 모의에 의한 결과가 실험 결과와 보다 더 잘 일치함을 확인할 수 있다.



▶▶ 그림 1. 댐 파괴-기둥 모의



▶▶ 그림 2. 기둥 전면부의 유속 비교



▶▶ 그림 3. 기둥에 작용하는 힘의 비교

### Ⅲ. 결론

#### 1. 결과 해석 및 향후 연구방향

본 연구에서는 레벨셋 기법을 이용하여 3차원 댐 파괴 문제를 모의하고 이를 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 보였다. 향후 정교한 난류모형의 적용, 병렬처리 등의 추가 연구를 통하여 모형의 기능을 향상시킬 예정이다.

#### ■ 참고 문헌 ■

- [1] Árnason, H. (2005). Interactions between an incident bore and a free-standing coastal structure, Doctoral dissertation, The University of Washington, Seattle.
- [2] Gómez-Gesteira, M. and Dalrymple, R.A. "Using a 3D SPH method for wave impact on a tall structure, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, 130, 2, 63-69, 2004
- [3] Lee, H. "Level-Set Finite Element Simulation of Free-Surface Flow", Doctoral dissertation, The University of Iowa, Iowa City, 2007.
- [4] Osher, S. and Sethian, J. A. "Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations", Journal of Computational Physics, 79(1): 12-49, 1988.