

# 비정상 통계적 난류모형을 이용한 중력류의 수치모의

## Numerical Simulations of Gravity Currents Using Unsteady Statistical Turbulence Models

백중철\*

Joongcheol Paik

### 요 지

벽 근처에서의 흐름(near wall flow)을 해석하기 위한 낮은 레이놀즈수 수정(low-Reynolds number modification)을 포함하는 통계학적 난류모형을 이용한 3차원 비정상 레이놀즈-평균 나비에-스톡스 (URANS) 계산을 실시하여 사각형 수로에서의 중력류를 모의하였다. 3차원 계산 결과를 2차원 URANS 모의에 의한 계산 결과 그리고 실험결과와 비교하였다. 이 연구 결과는 적정 시·공간적 수치해상도를 가지고 벽 근처에서의 흐름을 주의 깊게 직접 해석하는 3차원 URANS 수치모의는 2차원 계산으로는 해석할 수 없는 대규모 Kelvin-Helmholtz 와구조 (vortical structure)의 붕괴(breakdown) 그리고 중력류 선단부에서 발달하는 Lobe-and-Cleft 흐름 불안정 등을 포함하는 중력류의 동적 특성을 높은 정확도로 재현할 수 있음을 보여준다.

**핵심용어** : 중력류, 3차원 수치해석, 통계적 난류모형, Kelvin-Helmholtz 와구조, Lobe-and-Cleft 불안정

### 1. 서론

중력류(gravity current)는 하나의 유체가 또 다른 유체 내에서 유체간의 밀도차에 의해서 추진 되는 흐름이다. 추진력을 제공하는 비중의 차이는 용존 또는 부유물질의 차이 또는 온도의 차이에 기인한다고 볼 수 있으며, 중력류의 거동은 부력, 관성력 그리고 점성력의 상대적인 균형에 의해서 특성화 된다. 중력류는 여러 가지 다양한 자연적인 또는 인위적인 상황에서 형성이 되며 그들의 동적 특성을 이해하는 것은 많은 과학 및 공학 분야에서 중요하다 (Simpson 1997). 중력류에 대한 연구는 하천, 하구, 해안 및 해양, 저수지, 대기 등에서의 현장 관측, 실험실에서 실험적 관측 그리고 수치모의에 의해서 이루어지고 있다. 실험적 연구(예를 들면, Huppert and Simpson 1980, Maxworthy and Nokes 2007)는 중력류의 동적 특성에 대해서 오늘날 우리가 알고 있는 많은 것들을 재현하지만, 축척효과에 따른 문제점을 안고 있으며, 대규모 사건들에 대해서는 단지 근사적인 재현만 가능한 반면, 수치모의는 시·공간적 규모에 상관없이 중력류 발달의 전개 내력에 대한 정보를 확보하여, 중력류의 동적 특성을 규명할 수 있는 이점을 가지고 있다. 중력류에 대한 많은 직접수치모의(direct numerical simulation, DNS)와 대규모 와 모의(large eddy simulation, LES) 결과가 발표되고 있다(Härtel et al. 2000, Necker et al. 2005, Ooi et al. 2007, Cantero et al. 2008). 중력류의 DNS와 LES는 중력류와 주변류의 경계를 가로지르는 흐름의 동적특성을 규

\* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : [paik@nukw.ac.kr](mailto:paik@nukw.ac.kr)

명하고 그 흐름을 이해하는데 중요한 공헌을 하고 있지만, 지나치게 많은 계산량으로 인하여 실제 상황에 적용할 경우 제한이 있다. 현재까지 현장 규모의 레이놀즈수와 실제 복잡한 지형학적 조건 하에서 중력류 흐름을 예측하기 위한 연구는 대부분 2차원 URANS(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 모형의 적용에 의존하고 있다 (Choi & García 1999, Huang et al. 2005). 2차원 수치해석은 중력류의 초기 슬러핑 단계(slumping phase)에서는 중력류의 전파속도 그리고 경계면에서 발달하는 Kelvin-Helmholtz(K-H) 와구조(vortical structures)의 발생을 어느 정도 정확하게 재현할 수 있으나, 그 이후에는 전파속도의 정확한 계산에 한계가 있고, 3차원 계산에 의해서만 해석할 수 있는 K-H 와구조의 붕괴 그리고 돌출부와 쪼개진 조각 구조(lobe-and-cleft, L-C)의 흐름 불안정 등을 재현하지 못한다. 한편, URANS 모의는 DNS와 LES 결과 그리고 실험에서 보여 진 중력류의 동적 특성을 재현하지 못하며 다소 분산된 경계면에서의 흐름 형태를 재현하는 경향이 있다. URANS 모형이 중력류의 동적 특성을 해석하지 못하는 것은 충분치 않은 수치해상도(numerical resolution)와 대부분의 URANS 계산이 벽함수(wall functions)을 고려한 표준 난류모형을 적용하기 때문이라고 판단된다. 이 연구에서는 부력항을 고려한 낮은 레이놀즈수( low Reynolds number, LRN)  $k-\tilde{\epsilon}$  모형 (Hwang and Lin 1998)을 이용하여 벽법칙을 고려하지 않고 직접 벽 근처에서의 흐름을 해석하는 URANS 모의를 공학적으로 접근 가능한 수치해상도를 이용하여 실시하였다. 이 연구는 3차원 URANS 모형도 적당한 수치해상도상에서 벽 근처에서의 흐름을 적절히 직접 해석할 경우 DNS나 LES를 통해서만 재현되었던 K-H 와구조의 작은 구조로의 붕괴 그리고 L-C 불안정성 등을 해석할 수 있음을 보여준다.

## 2. 수치기법

이 연구는 일반 Boussinesq 근사화가 유효한 상대적으로 작은 밀도차를 가지는 흐름을 대상으로 한다. 즉, 부력항에 대한 것 이외의 모든 밀도의 변화는 무시할 수 있다. 지배방정식은 레이놀즈 응력을 와점성계수를 이용하여 평균 변형을 텐서와 관련시키기 위한 Boussinesq 가설을 결합한 것으로 비압축성 중력류 흐름에 대한 3차원 비정상 레이놀즈 평균 나비에 스토크스(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS) 방정식이다. 난류모형으로는 Hwang과 Lin (1998)이 제안한 부력항을 확장한 낮은 레이놀즈수 (low-Reynolds number, LRN)  $k-\tilde{\epsilon}$  모형을 이용하였다. URANS 및 난류모형 방정식은 유체밀도의 변동을 결정하는데 사용되는 용질의 농도  $S$ 에 대한 레이놀즈 평균 수송방정식과 동시에 해석하게 된다. 밀도는 농도와 선형관계에 있다고 가정하고 상태방정식  $\rho = \rho_o(1.0 + mS)$ 으로 결정된다(식에서  $m$ 은 상수). 일반화된 곡선좌표계에서 완전 보존형으로 공식화 된 지배방정식을 이중시간단계(dual-time-stepping), 인공압축성(artificial compressibility, AC) 반복기법을 이용하여 해석하였다. 지배방정식의 AC 형식을 엇갈리지 않은(nonstaggered) 계산 격자에서 2차 정확도의 유한체적법을 이용하여 이산화 하였다. 지배방정식 중 운동량 방정식에서의 이송항(convective term)은 QUICK 스킴을 이용하여 이산화 하며 온도 수송에서의 이송항은 단조의 수치진동이 없는 해(monotone oscillation-free solution)를 구하기 위하여 ULTIMATE 제한자(limiter) (Leonard, 1991)를 이용하여 유계된(bounded) QUICK 스킴을 이용하여 이산화 하였다. 기타, 다른 항들은 중앙차분법을 이용하여 이산화 하였다. 압력장에서의 수치진동을 제거하기 위하여 Sotiropoulos와 Abdallah (1991)이 제안한 3차 정확도 4차 차분 인공소산(artificial dissipation) 기법을 적용하였다. 방정식계(system of equations)는 국부시간단계(local-time-stepping)를 보장한 압력에 기반을 둔 음해 전제조건자(pressure-based implicit preconditioner)를 이용하여 적분하였으며, 수치해의 수렴을 가속하기 위하여 V-순환 다

중격자법(multigrid method)를 적용하였다. 모든 고체경계에서 속도에 대해서는 비활조건(no-slip condition)을, 압력에 대해서는 선형왜압법을, 그리고 온도에 대해서는 0-차 왜압법을 적용하였다. 계산영역의 출구에서는 Paik et al. (2005)이 제안한 특성곡선법에 근거를 둔 비반사(nonreflecting) 경계조건을 적용하여 복잡한 흐름구조가 왜곡되지 않고 계산영역을 빠져나가도록 하였다. 모형의 세부 기술적 측면에 대해서는 Paik et al. (2005)에 자세하게 설명되어 있다.

### 3. 적용

Huppert와 Simpson (1980)이 수심  $h_o=10\text{cm}$ , 길이 $=12h_o$ 의 사각형 개수로 구간에서, 초기 중력류의 길이  $x_o=30\text{cm}$  조건하에서 수행하였던 실험과 동일한 중력류 발생 조건에 대해서 LRN  $k-\tilde{\epsilon}$  모형을 적용한 3차원 URANS 계산을 실시하였다. 계산영역은  $350 \times 75 \times 105$  (총  $2.8 \times 10^6$ ) 격자를 이용하여 이산화 하였으며, 물리적인 계산시간 간격은 0.01s를 이용하였다. 실험에 이용된 주변류(ambient flow)와 중력류의 밀도는 각각  $1000\text{kg/m}^3$  과  $1011.4\text{kg/m}^3$ 이었다. 그림 1은 시간  $t = 17.5\text{s}$ 에서 계산된 순간 밀도  $1005.7\text{ kg/m}^3$  값의 등치면과 흐름방향 와도의 등치면을 보여준다. 주목할 것은 계산된 흐름의 3차원성의 정도와 전반적인 흐름의 복잡성이다. 3차원 URANS 모의는 중력류 머리(head) 부분에서 발달하는 L-C 불안정을 모의하고 있으며 경계면에서 발달하는 H-K 와구조와 꼬리부분에서 발생하는 이들 와구조의 붕괴를 재현하고 있다. 중력류 머리 부분에서의 L-C 불안정의 발생은 진행되는 중력류 머리 부분의 아래 벽을 따라서 발달하는 흐름방향 와구조와 관련이 있다 (Necker et al. 2005). 그림 1의 와도 등치면이 보여 주는 바와 같이, 이 연구에서 수행한 수치모의는 중력류 아래 부분에서의 흐름방향 조직 와구조(coherent vortical structures)의 발생을 재현하고 있다. 이 결과는 중력류의 3차원적 불안정 흐름의 본질은 벽 근처에서 생성되는 와에 의해서 추진된 것임을 보여준다. 아울러 지면의 제약상 이 논문에는 포함하지 않았지만 벽함수를 이용한 3차원 URANS모의는 이러한 바닥면을 따라 발달하는 조직구조를 재현할 수 없는 것으로 나타났다. 그림 2는 중력류 꼬리(tail) 부분에서 3차원 URANS 모형에 의해서 계산된 횡방향으로 평균한 밀도의 분포를 2차원 URANS 계산결과 그리고 실험 자료와 비교한 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 2차원 모의 결과에서는 경계면을 따라 발달한 대규모 K-H 와구조가 붕괴되지 않고 꼬리 부분에서 존재하는, 반면에 3차원 계산은 3차원적 흐름 불안정을 모의함으로써 이들 대규모 경계면 와구조가 작은 규모의 와구조로 붕괴되는 현상을 실험결과와 유사하게 재현하고 있음을 보여준다. 그림 3은 수로 중앙부분 횡방향 연직면에서 도시한 계산된 순간 속도 벡터와 와도 분포이다. 이 그림은 중력류 머리부분의 전파속도보다 큰 유속분포가 경계면을 따라서 발달함을 보여준다. 이러한 경향은 중력류 몸통(body) 부분에서 대규모 경계면 와(interfacial vortices)의 발달 때문으로 유사한 형상의 중력류 실험 자료와 일치한다(Härtel et al. 2000). 그림 3(b)에서 종방향의 물결치는 얇은 부(negative)의 와도가 모의 되었는데, 이것은 주변류를 중력류 머리부분으로 유입시켜 부력의 영향을 감소시킴으로서 흐름의 동력학적 특성을 지배한다.

### 4. 결 론

공학적으로 접근 가능한 수치해상도상에서 부력항을 고려한 낮은 레이놀즈수(LRN)  $k-\tilde{\epsilon}$  모형을 적용하여 직접 벽 근처에서의 흐름을 해석하는 3차원 URANS 계산을 실시하여, 사각형 개수

로에서의 중력류 흐름을 모의하였다. 해석결과는 적정 시·공간적 수치해상도를 가지고 벽 근처에서의 흐름을 주의 깊게 직접 해석하는 3차원 URANS 수치모의는 2차원 계산으로는 해석할 수 없으며, 지금까지 3차원 DNS와 LES에 의해서만 해석이 되었던 대규모 K-H 와구조의 소규모 구조로의 붕괴 그리고 중력류 선단부에서 발달하는 L-C흐름 불안정 등을 포함하는 중력류의 동적 특성을 재현할 수 있음을 보여주었다.

### 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(과제번호# '08지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. Cantero, M., Balachander, S., García, M. and Bock, D. (2008). Turbulent structures in planar gravity currents and their influence on the flow dynamics, *J. Geophys. Res. - Oceans*, Vol. 113, C08018.
2. Choi, S. and García, M. H. (2002).  $k-\epsilon$  turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope, *ASCE J. Hydraul. Eng.*, Vol. 128, pp. 55-63.
3. Härtel, C., Meiburg, E. and Necker, F. (2000). Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. Part 1. Flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries, *J. Fluid Mech.*, Vol. 418, pp. 189-212.
4. Henkes, R. A. W. M., Van Der Vlugt, F. F. and Hoogendoorn, C. J. (1991). Natural-convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 377-388.
5. Huang, H., Imran, J. and Pirmez, C. (2005). Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 131, pp. 283-283.
6. Huppert, H. E. and Simpson, J. E. (1980). The slumping of gravity currents, *J. Fluid Mech.*, Vol. 99, pp. 785-799.
7. Hwang, C. B. and Lin, C. A. (1998). Improved low-Reynolds-number  $k-\tilde{\epsilon}$  model based on direct numerical simulation data, *AIAA J.*, Vol. 36, pp. 38-43.
8. Maxworthy T. and Nokes, R. I. (2007). Experiments on gravity currents propagating down slopes. Part 1. The release of a fixed volume of heavy fluid from an enclosed lock into an open channel, *J. Fluid Mech.*, Col. 584, pp. 433-453.
9. Necker, F., Härtel, C., Kleiser, L. and Meiburg, E. (2005). Mixing and dissipation in particle driven gravity currents, *J. Fluid Mech.*, Vol. 308, 289-311.
10. Ooi, S. K., Constantinescu, G. and Weber, L. (2007). A numerical study of intrusive compositional gravity currents, *Phys. Fluids*, Vol. 19, 076602.
11. Paik, J., Sotiropoulos, F. and Sale, M. J. (2005). Numerical simulation of swirling flow in a complex hydro-turbine draft tube using unsteady statistical turbulence models, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 131, pp. 441-456.
12. Simpson, J. E. (1997). *Gravity Currents in the Environment and the Laboratory*, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press, New York.

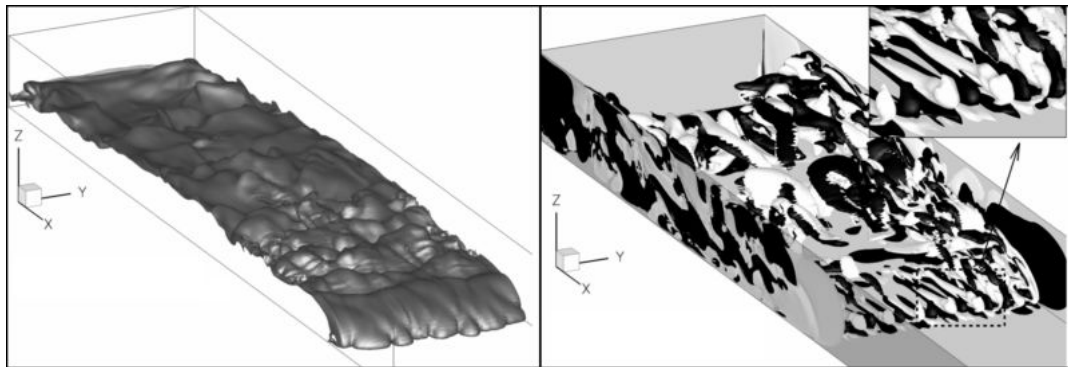


그림 1. 3차원 URANS 모형에 의해서 계산된 (왼쪽) 밀도(density) 등치면과 (b) 흐름 방향 와도(streamwise vorticity) 등치면

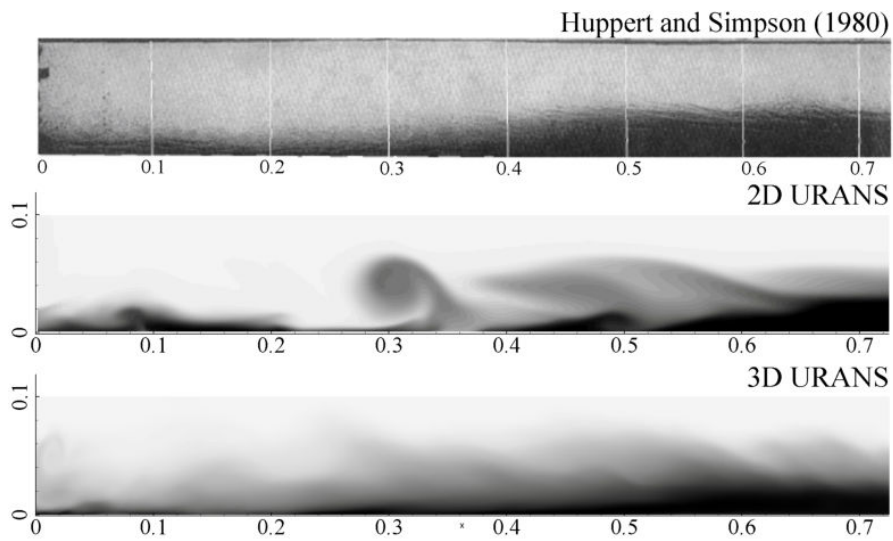


그림 2. 중력류 꼬리 부분에서의 실험관측 자료(Huppert and Simpson, 1980)와 2차원 및 3차원 URANS 모형에 의해서 계산된 밀도 등치선의 비교.

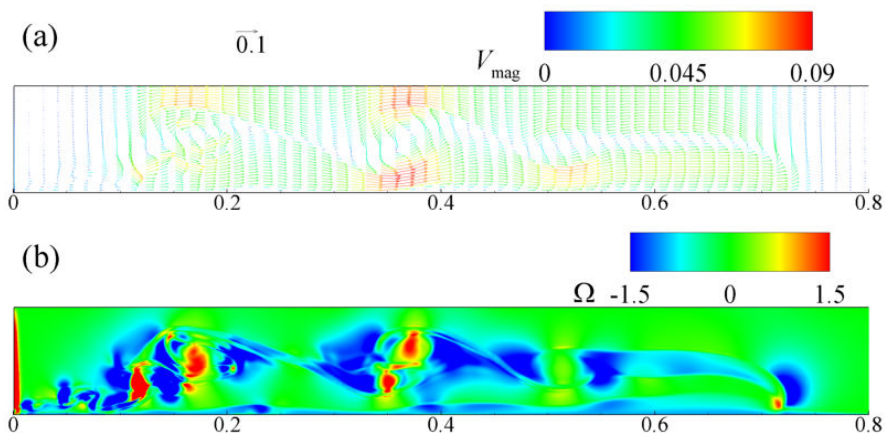


그림 3. 계산된 순간 흐름장: (a) 매 8번째 수평격자 및 4번째 연직격자에서의 계산된 유속벡터, (b) 횡방향 와도(spanwise vorticity) 등치선