



A multiphase flow modeling of gravity currents in a rectangular channel

Kim, Byungjoo^a · Paik, Joongcheol^{b*}

^aMaster's Student, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

^bProfessor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

Paper number: 19-059

Received: 31 July 2019; Revised: 26 September 2019; Accepted: 26 September 2019

Abstract

A multiphase flow modeling approach equipped with a hybrid turbulence modeling method is applied to compute the gravity currents in a rectangular channel. The present multiphase solver considers the dense fluid, the less-dense ambient fluid and the air above free surface as three phases with separate flow equations for each phase. The turbulent effect is simulated by the IDDES (improved delayed detach eddy simulation), a hybrid RANS/LES, approach which resolves the turbulent flow away from the wall in the LES mode and models the near wall flow in RANS mode on moderately fine computational meshes. The numerical results show that the present model can successfully reproduce the gravity currents in terms of the propagation speed of the current heads and the emergence of large-scale Kelvin-Helmholtz type interfacial billows and their three dimensional break down into smaller turbulent structures, even on the relatively coarse mesh for wall-modeled RANS computation with low-Reynolds number turbulence model. The present solutions reveal that the modeling approach can capture the large-scale three dimensional behaviors of gravity current head accompanied by the lobe-and-cleft instability at affordable computational resources, which is comparable to the LES results obtained on much fine meshes. It demonstrates that the multiphase modeling method using the hybrid turbulence model can be a promising engineering solver for predicting the physical behaviors of gravity currents in natural environmental configurations.

Keywords: Gravity currents, Multiphase flow, Hybrid turbulence modeling, Detached-eddy simulation

사각형 수로에서 중력류의 다상흐름 수치모의

김병주^a · 백중철^{b*}

^a강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, ^b강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 교수

요 지

다상흐름 모델링 기법과 하이브리드 난류 모델링 기법을 결합한 수치모형을 이용하여 사각형 수로에서의 중력류를 수치모의 하였다. 이 연구에서 적용한 다상흐름 해석기법은 밀도가 큰 중력류 유체, 상대적으로 밀도가 작은 주변류 유체 그리고 자유수면 위에서 흐르는 공기를 3개의 상으로 처리하며, 각 상에 대해서 분리된 흐름 지배방정식을 적용한다. 난류흐름은 벽경계 근처에서는 RANS 모드로 모의하고 벽에서 떨어진 영역에서는 LES 모드로 해석하는 하이브리드 RANS/LES 방법의 일종인 IDDES 기법을 이용하여 해석한다. 이 연구에서 적용한 모델링 기법은 중력류의 머리의 전파속도를 실험값과 일치하게 잘 예측하는 것으로 나타났다. 수치해석 결과는 아울러 낮은 레이놀즈수 난류모형을 이용한 RANS 수치모의에서 이용되는 정도의 격자해상도에서도 큰 규모의 Kelvin-Helmholtz 형식의 경계면 외의 발달과 이들 와가 지속적으로 3차원 형식의 붕괴를 거쳐 작은 난류구조로 분해되면서 난류에너지가 소산되는 현상을 성공적으로 예측함을 보여준다. 적용한 수치모의 기법은 공학적으로 접근 가능한 격자해상도에서 돌출-쪼개짐 흐름 불안정을 동반한 중력류 머리부분의 3차원 거동 특성을 잘 재현하며, 이 결과는 보다 높은 격자해상도에서 구해진 LES 결과에 상응하는 것으로 나타났다. 이 연구결과는 하이브리드 난류모델링 기법과 다상흐름 해석기법을 병합한 수치모형이 자연상태에서 복잡한 중력류의 물리적 거동을 예측하는데 공학적으로 유망한 방법임을 보여준다.

핵심용어: 중력류, 다상흐름, 하이브리드 난류모델링, 분리와모의

*Corresponding Author. Tel: +82-33-640-3030
E-mail: paik@gwnu.ac.kr (J. Paik)

1. 서론

하나의 유체가 밀도차에 따라서 주변 다른 유체의 내부 또는 상부나 하부에서 수평으로 이동하는 흐름 현상을 중력류(gravity current)라 한다. 유체 사이의 밀도차에 의해서 발생하므로 밀도류(density currents)라고도 한다. 홍수시 성층화된 저수지로 유입되는 탁류는 대표적인 중력류로서 호소수의 중간층을 따라서 이동하면서 침강 또는 부상하는 것이 특징이다(Choi *et al.*, 2017). 하구역에서 바다로 유입되는 하천의 물은 바닷물과의 밀도차에 의해서 중력류를 형성하는데, 하천의 물은 수면을 따라서 그리고 바닷물은 바닥을 따라서 염수 썩기를 형성하면서 흐르는 것이 대표적인 현상이다(Lee and Hur, 2014). 일반하천에서도 탁도나 온도차에 의해서 밀도가 다른 지류 흐름이 분류로 유입될 때도 중력류 현상을 볼 수 있다. 이와 같이 하천, 하구, 호수 등에서 밀도가 다른 유체가 유입될 때 유입수의 거동을 정확하게 예측하는 것은 수계를 관리하고 오염저감을 위한 대책 수립에 매우 중요하다(Simpson, 1997; Huppert, 2006; Choi *et al.*, 2017).

중력류의 발생 및 전파 기작을 규명하기 위해서 주로 실험 연구가 많이 이뤄져왔다(Benjamin, 1968; Britter and Simpson, 1981; Hacker *et al.*, 1996; Hallworth *et al.*, 1996; Sutherland *et al.*, 2004; Maxworthy and Nokes, 2007; Dai, 2013; Lee *et al.*, 2018). 중력류는 중력에 의한 체적력으로 추진되지만 점성력과 상대적 크기에 따라 비점성중력류(inviscid current)와 점성중력류(viscous current)로 분류할 수 있으며, 천수(shallow-water)이론과 윤활(lubrication) 근사화를 통해서 문제를 단순화하여 해석적으로 중력류 해를 구할 수도 있다(Klemp *et al.*, 1994; Ungarish, 2007). 하지만, 이러한 연구는 복잡한 지형에서 난류의 영향을 무시할 수 없는 경우에는 적용에 한계가 있다.

컴퓨터 기술 발달로 고성능 클러스터 활용이 가능해지면서 많은 수치모의 연구가 이루어지고 있다. 80년대 후반부터 표준 $k-\epsilon$ 난류모형이 공학적인 문제에 적용되기 시작하면서, 벽함수(wall functions)를 결합한 표준 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용한 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 수치모의 연구가 많이 이뤄졌다(Eidsvik and Brors, 1989; Bournet *et al.*, 1999; Choi and García, 2002; Huang *et al.*, 2005). 이러한 표준 $k-\epsilon$ 모형을 이용한 RANS 계산은 적은 계산량으로 적용하기가 용이하지만, 몇가지 단점이 있다. 경계면을 따라 중력류의 난류에너지 소산율을 제어하는 난류모형에서의 경험계수의 값 설정에 명확한 근거가 없다는 것이다. 무엇보다, 표준 $k-\epsilon$ 을 이용할 경우는 계산격자를 구성할 때 벽에

인접한 첫번째 계산셀이 대수층(logarithmic layer)에 위치해야 하지만, 복잡한 지형에서 특히 중력류 발생 후반부에 유속이 느려지면서 관성력과 부력의 균형하에서 이동하는 관성상(inertial phase) 그리고 점성 영향이 지배적으로 작용하면서 부력과 균형을 이루는 점성상(viscous phase)에서는 전파 유속을 과대산정할 수 있다. 벽함수를 이용하는 표준 $k-\epsilon$ 모형과 관련된 한계를 극복하기 위해서 Paik *et al.* (2009)는 벽 근처에서 조밀한 격자를 이용하여 벽함수 도움 없이 해석이 가능한 LRN (low Reynolds number) $k-\epsilon$ 모형을 적용하여 초기 꺼짐상(slumping phase)부터 관성상 전반부에 걸쳐 발달하는 중력류를 성공적으로 모의하였다. 하지만 여전히 난류에너지 소산율을 제어하는 경험계수를 포함하고 중력류 경계면을 따라 발생하는 와의 붕괴와 난류 혼합의 증가를 과소예측하는 RANS 수치모의의 한계는 여전히 남아있다.

RANS 수치모의의 분명한 한계 때문에 최근의 중력류에 대한 수치모의 연구는 거의 대부분 LES (large eddy simulations) (Patterson *et al.*, 2006; Ooi *et al.*, 2006; Steenhauer *et al.*, 2017; Inghilesi *et al.*, 2018)와 DNS (direct numerical simulations) (Härtel *et al.*, 2000; Cantero *et al.*, 2007; Nasr-Azadani and Meiburg, 2014; Zgheib *et al.*, 2016)에 의해서 이뤄지고 있다. 이러한 LES와 DNS 연구는 매우 많은 격자수를 필요로 하여 공학적인 실제문제에 적용하는 데는 한계가 있다. 이들 LES와 DNS 연구의 지배방정식은 흐름에 대한 연속방정식과 운동량방정식 그리고 밀도 또는 농도가 종속변수인 수송방정식으로 구성된다.

이 연구에서는 밀도차에 의한 흐름 해석을 위해서 밀도 또는 농도 수송방정식을 이용하는 대신 주변류와 중력류 그리고 자유수면 위의 공기를 각각의 유체상(fluid phase)로 해석하는 다상(multiphase)흐름 해석모형을 이용하여 중력류를 모의하고자 한다. 난류의 영향은 RANS와 LES을 혼합한 형태인 하이브리드 RANS/LES 모형중 하나인 IDDES (improved delayed detached-eddy simulation)기법을 이용하여 해석함으로써, 중력류 경계면에서 와의 붕괴로 인한 혼합의 발달을 예측하는데 문제가 있는 RANS 모형의 한계 그리고 벽면근처에서의 흐름 해석을 위해 높은 격자 해상도가 요구되어 계산 효율성이 떨어지는 LES 모형의 한계를 극복하고자 한다. 본 연구에서 구축된 다상-IDDES 수치모형을 이용하여 실험수소에서 관측된 중력의 실험값, 기존 LRN-난류모형을 이용한 RANS 해석결과 그리고 LES 해석결과와 비교하여 구축된 모형의 적용성을 평가한다.

2. 수치모의 기법

2.1 흐름 방정식

이 연구에서 다루는 다상 유체는, 주변류(ambient fluid)로서 물 그리고 중력류의 주체인 밀도가 높은 유체(dense fluid) 그리고 공기의 3가지 상(phase)로 구성된다. 다상흐름 해석기법으로 널리 알려진 VoF (Volume of Fluid) 기법은 각 상의 경계가 분명한 분리흐름(segregated flows) 해석에 적합하다. 이 연구에서 다루는 주변류(ambient flow)와 중력류는 공기와는 분리되었다고 볼 수 있지만 두 유체 흐름은 서로 혼합된 분산흐름(dispersed flow)이 된다. 따라서 이러한 분리흐름과 분산흐름을 동시에 고려할 수 있는 하이브리드 VoF 기법을 적용한다. 수치모형은 기본적으로 오픈소스 소프트웨어인 OpenFOAM toolbox (OpenFOAM, 2018)를 이용하였다. 지배방정식은 각각의 유체상에 대해서 개별적인 연속방정식과 운동량방정식 그리고 각 유체상의 경계면을 추적하기 위해서 VoF 방법과 유사한 방정식으로 다음과 같이 구성된다.

k -상 유체에 대한 연속방정식

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + u_k \cdot \nabla \alpha_k = 0 \quad (1)$$

k -상 유체에 대한 운동량방정식

$$\frac{\partial (\rho_k \alpha_k u_k)}{\partial t} + (\rho_k \alpha_k u_k \cdot \nabla) u_k = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t)_k \alpha_k \nabla u_k) + \rho_k \alpha_k g + F_{Dk} + F_{Sk} \quad (2)$$

k -상 유체에 대한 VoF 방정식

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + u_k \cdot \nabla \alpha_k + \nabla \cdot (u_c \alpha_k (1 - \alpha_k)) = 0, u_c = C_\alpha \frac{\nabla \alpha_k}{\text{mag}(\nabla \alpha_k)} \quad (3)$$

여기서, k 는 각 상의 순서를 나타내는 지수, α_k 는 k -유체 부피 분할(volume fraction) 변수, u_k 는 각 유체의 유속벡터, ρ_k 는 각 유체의 밀도, p 는 전압력, μ_k 와 μ_{tk} 는 각 유체의 동점성계수와 난류동점성계수, g 는 중력가속도 벡터이다. 운동량방정식에서 항력 F_{Dk} 는 공기방울이 자유수면으로부터 연행되어 유체와 상호작용을 할 때 발생하는 힘으로 이 연구에서는 수면 변동이 크지 않아 무시할 수 있다. 중력류가 떨어져나가 주변류 속으로 연행될 때 또는 반대로 주변류가 연행되어 중력류내에서 상대속도를 가지고 유동할 때 발생하는 항력은 OpenFOAM 툴박스에 있는 Schiller and Naumann (1935) 모형을 이용하여 고려하였다. 표면장력 σ 에 의해서 발생하는 힘 F_{sk} 는 다음과 같이 정의되며, 서로 혼합이 되지 않는 주변류와 공기 그리고

중력류와 공기 사이에 작용한다.

$$F_{sk} = \sigma \vartheta(x) n, n = \nabla \alpha_k / \text{mag}(\nabla \alpha_k), \vartheta(x) = \nabla \cdot n \quad (4)$$

이 연구에서는 중력류, 주변류 그리고 공기의 3개 상을 고려한 다상흐름 모델링에 관한 연구이며, 각 유체들 사이의 경계에서의 밀도 및 점성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \sum_k \rho_k \alpha_k \quad (5)$$

$$\mu = \sum_k \mu_k \alpha_k \quad (6)$$

2.2 난류 모형

난류흐름 해석을 위해서 이 연구에서는 하이브리드 RANS/LES 모형의 일종으로서 높은 레이놀즈 수 흐름에 대해서 공학적으로 유연하고 합리적으로 해석을 수행할 수 있는 IDDES (Shur *et al.*, 2008)를 적용하였다. 이 연구에서 적용한 하이브리드 RANS/LES 기법은 벽에서 떨어진 영역에서는 LES 모드로 난류 흐름을 해석하고 경계층의 아래 부분에 해당하는 벽근처 영역에서는 LRN-난류모형인 Spalart-Allmaras 모형 (Spalart and Allmaras, 1994) 또는 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 모형(Menter, 1994)에 근거해서 RANS 기법으로 해석하는 것이다. 결과적으로 벽에서 떨어진(detached)와 (eddies)는 직접 LES로 해석하고, 벽근처 흐름은 난류모형으로 모델링함으로써 계산량을 줄이면서 LES에 준하는 해석결과를 얻을 수 있는 기법이다. IDDES 접근법은 DDES (delayed detached eddy simulation) 기법과 WMLES (wall-modeled LES)를 목표로 하는 하이브리드 모형과 결합한 것이다. 여기서 DDES 기법은 $k-\omega$ SST 모형에 근거를 둔 DES (detached eddy simulation) 모형(Strelets, 2001)을 Spalart *et al.* (2006)가 개발한 일명 차폐함수(shielding functions)을 이용하여 재구성한 것이다. DDES와 IDDES의 지배방정식은 Gritskevich *et al.* (2012)의 논문에 자세하게 소개되어 있으므로, 이 논문에서는 지면의 제약으로 지배방정식을 나열하지 않기로 한다.

2.3 이산화 기법

지배방정식은 2차 정확도의 유한차분법을 이용하여 해석하였다. 주변류와 중력류 유체에 대한 운동량방정식의 이송항 해석은 중앙차분(central differencing)기법을 이용하였으며, 공기와의 경계층에서 수치적인 흐름 불안정을 완화하기 위해서 공기 흐름에 대한 이송항에는 2차 정확도의 상향차분 기법(second-order accurate upwind scheme)을 적용하였다.

난류 방정식에서의 이송항은 Sweby 제한자(limiter)를 이용한 TVD (total variation diminishing) 기법을 그리고 유체의 부피분할(VoF) 방정식의 이송항은 van Leer 제한자를 이용한 TVD 기법을 이용하여 이산화하였다. 이외의 확산항과 생성항을 포함한 모든 항은 중앙차분법을 이용하여 이산화하였다. 연속방정식과 운동량방정식 결합하여 부정류 모드에서 해석하기 위해서 PISO (pressure implicit with splitting of operators) 알고리즘을 적용하였으며, 매 계산시간마다 반복 계산횟수는 4회로 설정하였다.

3. 적용 대상 및 계산 세부사항

실험실에서 재현되는 가장 일반적인 중력류의 형상은 연직 수문에 의해서 한쪽에는 밀도가 높은 유체가 감금되어 있고 다른 한쪽에는 상대적으로 밀도가 낮은 물이 채워져 있는 수조에서 이루어진다. 실험은 두 유체를 감금하고 있는 수문(lock gate, 이하 감금수문이라 함)을 들어 올리면, 상대적으로 무거운 유체는 바닥을 따라서 그리고 가벼운 유체는 수면을 따라서 이동하기 시작하며, 결과적으로 발생하는 중력류 흐름을 감금유체교환 흐름(lock-exchange flow)라고 한다. 이러한 중력류는 가벼운 유체 사이를 뚫고 나가는 강한 선단부를 이루는 머리(head) 그리고 그 뒤를 따라 흐르는 상대적으로 얇은 흐름이 꼬리(tail)를 형성하는 것이 일반적이다(Simpson, 1997).

수치모의 적용대상은 Hacker *et al.* (1996)이 실험을 통해 연구한 중력류이다. 이들은 폭 0.205 m, 깊이 0.5 m, 길이 3.48 m의 4각형 투명 아크릴(Perspex) 수조에 수심 H 의 물을 채우고 왼쪽 끝 벽으로부터 x_0 떨어진 거리에 연직 수문을 설치하여 두 영역으로 나누었다. 그 다음 순수한 물과의 밀도차 $\Delta\rho$ 가 얻어

질 때까지 수문의 한쪽에 일반 소금(NaCl)을 투입하였다. 모든 실험에서 결과적으로 감소된 유효중력(reduced gravity) 가속도 $g' \equiv g\Delta\rho/\rho_0$ 은 0.12 m/s^2 이었으며, 여기서 ρ_0 는 주변 유체 즉, 물의 밀도이다. 모든 실험은 바닥이 평평한 수평수로에서 이루어졌으며, 각 실험마다 초기 무거운 유체의 가로와 세로의 비 $R_A = H/x_0$ 는 각각 다르다. Hacker *et al.* (1996)의 실험들 중 Table 1에서 보인 바와 같이 2가지 경우에 대해서 수치 모의를 수행하였다. 수치모의 결과는 실험자료 그리고 Ooi *et al.* (2006)의 LES 결과값 그리고 Paik *et al.* (2009)의 LRN-난류모형을 이용한 RANS 결과값과 비교하여 본 연구에서 구축한 수치모의의 적용성을 평가한다.

Hacker *et al.* (1996)의 두가지 실험 중 C2에 대해서는 해상도가 다른 두개의 계산격자를 이용하여 격자 해상도에 대한 수치모의의 결과의 민감도를 분석하였다. 각 수치모의를 위한 계산영역과 계산격자의 구성을 정리하면 Table 2와 같다. 이 연구에서 생성한 계산셀의 총 수는 LRN-난류모형을 이용하여 RANS 수치모의를 수행한 Paik *et al.* (2009)이 적용한 계산셀의 총수와 비교하면 C1과 C2c는 각각 약 20%와 15% 많으며, C2f는 유사하다. 이 연구에서는 가벼운 유체와 무거운 유체 그리고 자유수면위의 공기 흐름까지 고려하는 다상흐름 모델링 기법을 적용함을 염두해두어야 한다. 따라서, 동일 적용대상에 대해서 이 연구에서 이용한 계산셀의 수가 이전 Paik *et al.* (2009)에서의 격자셀 수보다 조금 많기는 하지만 이것은 공기흐름까지 고려하기 때문이며, 결과적으로 주변류와 중력류 부분 해석을 위해서 이용한 계산격자의 해상도는 유사하다. 이 연구와 기존 Paik *et al.* (2009)의 계산격자와 수치모델링 방법의 차이를 Table 2에 정리하였다. 모든 벽면에 인접한 첫번째 계산셀의 중심으로부터 벽면까지의 거리는 무차원화한 y^+ 값이 1보다 크지 않도록 격자를 구성하였다.

일반적으로 중력류의 수치모의 연구에서는 계산 초기

Table 1. Experimental configurations of Hacker *et al.* (1996)

| Case | g' (m/s) | x_0 (m) | $H=2h$ (m) | $R_A = H/x_0$ | L/x_0 | $Fr_d = (u_j/g'H)^{1/2}$ | $Re_d = u_j h/\nu$ |
|------|------------|-----------|------------|---------------|---------|--------------------------|--------------------|
| C1 | 0.12 | 0.30 | 0.200 | 0.67 | 11.6 | 0.45 | 7,000 |
| C2 | 0.12 | 0.15 | 0.267 | 1.78 | 23.2 | 0.46 | 11,000 |

Table 2. Numerical cases and computational cells

| Case | L/x_0 | Computational cells $N_x \times N_y \times N_z (\times 10^6)$ | | Modeling approaches | |
|------|---------|---|---------------------------|---|---|
| | | Present study | Paik <i>et al.</i> (2009) | Present study | Paik <i>et al.</i> (2009) |
| C1 | 6.0 | 431×91×65 (2.55) | 430×81×65 (2.12) | Multi-phase, hybrid RANS/LES with IDDES model | Single-phase, URANS with low Re version of $k-\tilde{\epsilon}$ model |
| C2c | 12.0 | 475×87×75 (3.10) | 475×81×69 (2.65) | | |
| C2f | 12.0 | 641×113×101 (7.32) | 672×113×97(7.37) | | |

($t = 0$)에 주변류와 중력류의 최대 밀도차의 $\pm 1\%$ 밀도차로 경계면에 무작위로 어긋난 분포(random disturbances)를 주어 중력류 경계면에서의 와 발달과 관련된 3차원 불안정을 임의로 유도한다(Härtel *et al.*, 2000; Ooi *et al.*, 2006; Cantero *et al.*, 2007; Paik *et al.*, 2009). 하지만, 이 연구에서는 임의의 경계면 교란을 고려하지 않았음에도 불구하고, 경계면 와의 3차원적 구조가 기존 연구들과 유사하게 발달하는 것으로 나타났다.

4. 결과 및 분석

이 절에서는 먼저 본 연구에서 구한 수치모의 결과를 Hacker *et al.* (1996)의 실험결과 그리고 Paik *et al.* (2009)의 수치모의 결과와 비교하여 모형의 적용성을 평가한다. 아울러, 중력류 C2에 대해서는 격자해상도에 대한 수치해의 민감도 그리고 Ooi *et al.* (2006)의 LES 결과와 비교하여 모형의 성능을 평가한다. 그 다음 3차원 난류조직구조를 비교하여 중력류의 특성인 경계면와(interfacial billows) 발달과 돌출-쪼개짐(lobes-clefts, 이하 ‘L-C 구조’라 함)과 관련된 흐름 불안정 그리고 이에 따른 난류의 발달이 특징인 중력류의 동적 거동 특성을 분석한다.

중력류 C1에 대한 관측결과, RANS 모의결과 그리고 본 연구에서 구한 수치모의 결과를 비교하면 Fig. 1과 같다. 각 중력류는 감금수문을 개방하는 순간 중력류와 주변류의 경계면을 따라 Kelvin-Helmholtz (K-H) 와류(vortex) 형식의 경계면와가 발달하면서 주변류가 중력류 내로 연행(entrainment)되고 강한 혼합이 일어난다. 시간이 지나면서 중력류 머리(head) 부분은 지속적으로 하류로 전파되면서 경계면와들은

와붕괴(vortex breakdown)를 거치면서 보다 작은 구조로 전환되면서 난류에너지가 소산된다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있는 실험결과와 수치모의 결과의 근본적인 차이는 수치모의에서는 감금수문이 순간적으로 제거되는 반면에 실험에서는 시간차를 두고 연직 방향으로 제거되어 바닥을 따라 무거운 유체 일부가 먼저 이동하면서 수심중간부분에서 와류가 발생하기 때문이다. 나머지 Figs. 1(b)~1(e)에서 주어진 결과들은 중력류 머리의 전파 속도 그리고 전반적인 중력류 형상의 시간적 변화 측면에서 수치모의 결과가 실험결과와 양호하게 일치함을 보여준다. 이들 그림을 비교해보면, 기존 Paik *et al.* (2009)의 수치모의 결과는 중력류의 경계면이 다소 분산된(diffused) 형상을 보이는 한편, 이 연구 결과는 유사한 격자해상도에서 보다 선명하게 와들이 생성되고 붕괴되는 것으로 잘 재현함을 알 수 있다.

유사한 격자해상도에서 LRN-난류모형을 이용한 Paik *et al.* (2009)의 연구결과와 이 연구에서 구한 하이브리드 RANS/LES 수치해의 차이를 설명하기 위해서 각 모델링에서 모의된 와점성(eddy viscosity)의 크기를 Fig. 2에서 비교하였다. 그림에서 LRN-모형으로 계산된 와점성은 물의 점성값보다 약 30~40배 큰 값들이 분포하는 것으로 나타난 반면에 하이브리드 RANS/LES 모형에 의해서 계산된 와점성은 최대값이 물의 점성계수의 약 10배 이하인 것으로 나타났다. 이 결과는 본 연구에서 수행한 수치모의가 의도한 대로 대부분 영역에서 LES 모드에서 계산이 수행되었음을 나타낸다. 결과적으로 LRN-모형으로 계산된 중력류는 모의된 큰 와점성 값에 의해서 경계면에서 분포가 다소 분산된 것으로 보인다. 한편, 이 연구 결과에서는 흐름의 비정상성(unsteadiness)이 강하게 유지됨으로서 흐름의 변동성분과 관련된 난류에너지가 대부분 직접 해석되어(resolved), sgs (sub-grid scale) 규모의 모의

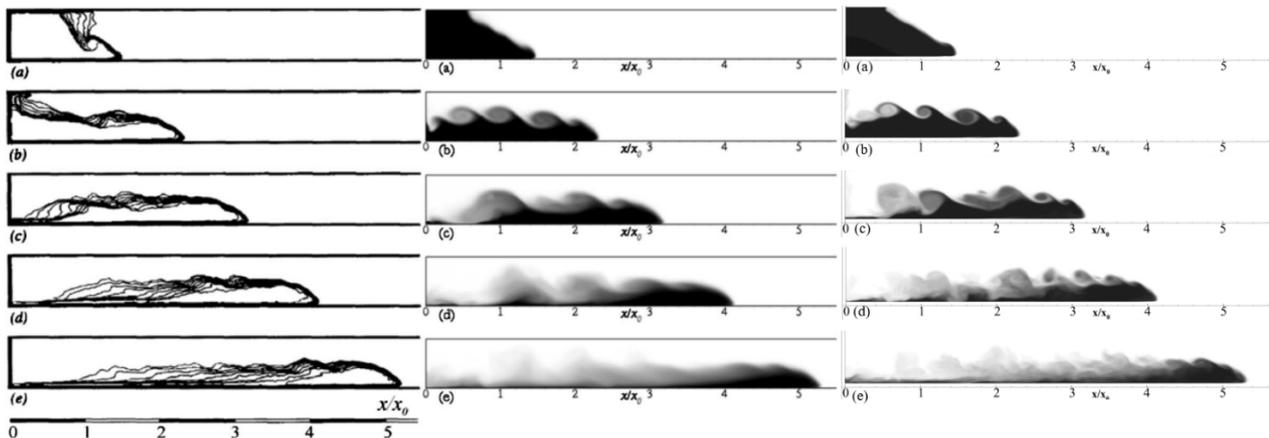


Fig. 1. Time evolution of the gravity current case C1 [left] experimentally measured by Hacker *et al.* (1996) and numerically predicted by [center] Paik *et al.* (2009) and [right] the present simulation at selected times (a) $t = 2.08$ s, (b) $t = 5.72$ s, (c) $t = 9.49$ s, (d) $t = 13.59$ s, and (e) $t = 18.72$ s

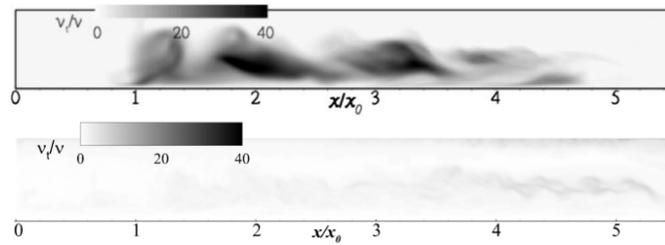


Fig. 2. Comparison of modeled eddy viscosity distribution computed by [upper] RANS of Paik *et al.* (2009) and [lower] present hybrid RANS/LES at $t = 19.72$ s for gravity current C1

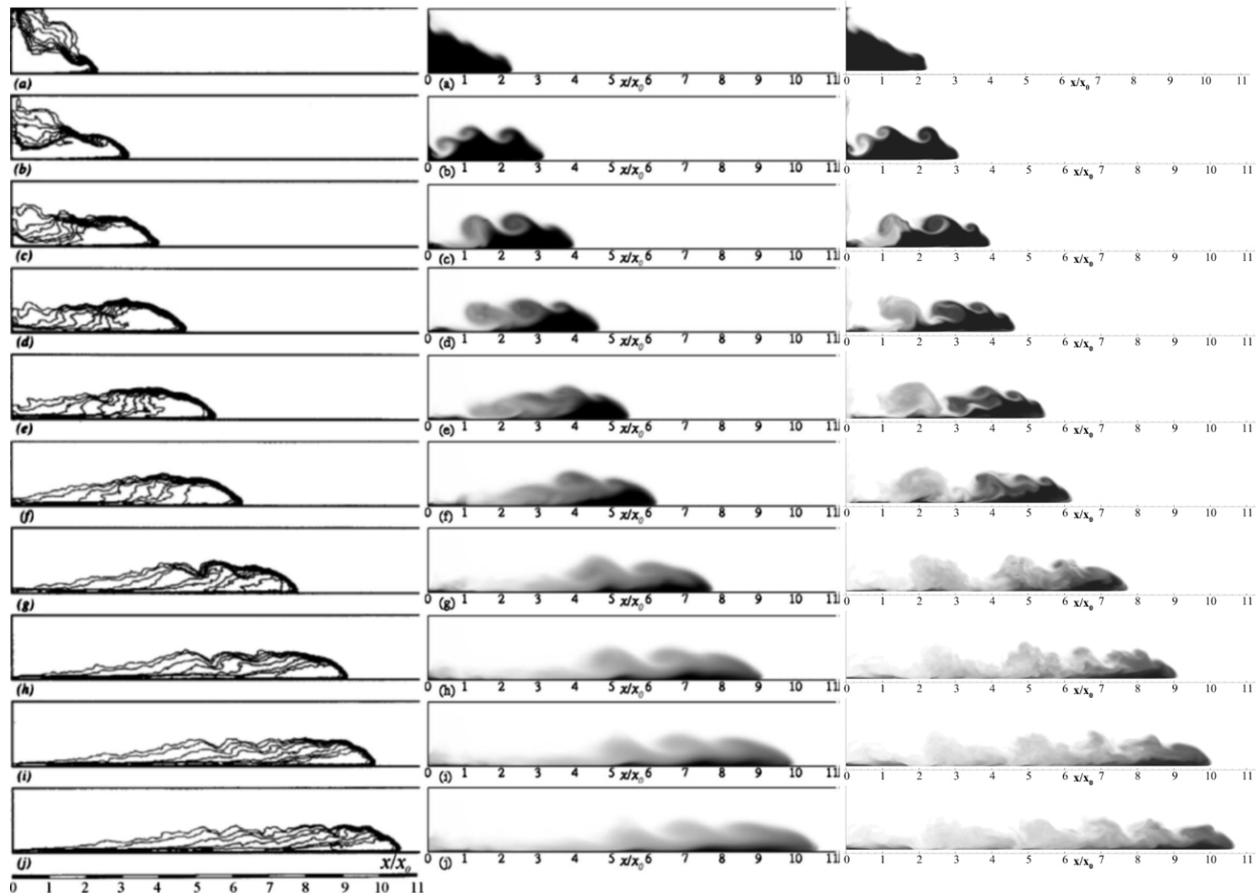


Fig. 3. Time evolution of the gravity current case C2 [left] experimentally measured by Hacker *et al.* (1996) and numerically predicted by [center] Paik *et al.* (2009) and [right] the present prediction computed on C2c mesh at selected times (a) $t = 2.52$ s, (b) $t = 4.08$ s, (c) $t = 5.64$ s, (d) $t = 6.96$ s, (e) $t = 8.52$ s, (f) $t = 9.96$ s, (g) $t = 12.96$ s, (h) $t = 15.78$ s, (i) $t = 17.70$ s, and (j) $t = 19.26$ s

된 와점성은 상대적으로 작은 값으로 나타났다.

중력류 C2에 대한 실험결과와 기존 LRN-모형의 실험결과 그리고 이 연구에서 구한 결과를 비교하면 Fig. 3에서와 같다. 중력류 C1의 경우와 마찬가지로 계산된 중력류의 전파속도는 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 전반적인 중력류의 분포와 거동도 본 연구에서 수행한 수치모의가 실험값을 보다 잘 재현하는 것으로 나타났다. 하지만, 이전 경우와 마찬

가지로 이 연구에서 적용한 수치모델링 기법은 중력류와 주변류의 경계면에서 복잡한 와의 발달과 붕괴를 보다 양호하게 재현하는 반면에서 기존 LRN-모형을 이용한 결과는 계산 후반부에서 발달된 와의 붕괴를 과소산정하고 있으며, 큰 와점성 값으로 인해서 경계면이 다소 분산된 형태를 갖는 것으로 나타났다. 중력류 C2에 대해서 구한 와점성의 분포를 비교하면 Fig. 4와 같으며, 하이브리드 모델링에서 모의된 와점성은

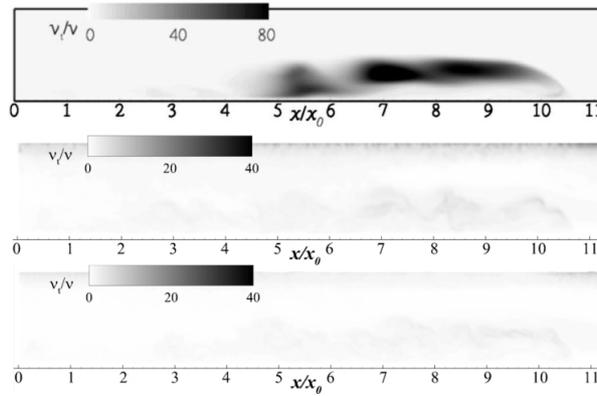


Fig. 4. Comparison of modeled eddy viscosity distribution computed by [upper] RANS of Paik *et al.* (2009) and [center and lower] present hybrid RANS/LES on C2c and C2f meshes, respectively, at $t = 19.26$ s for gravity current C2

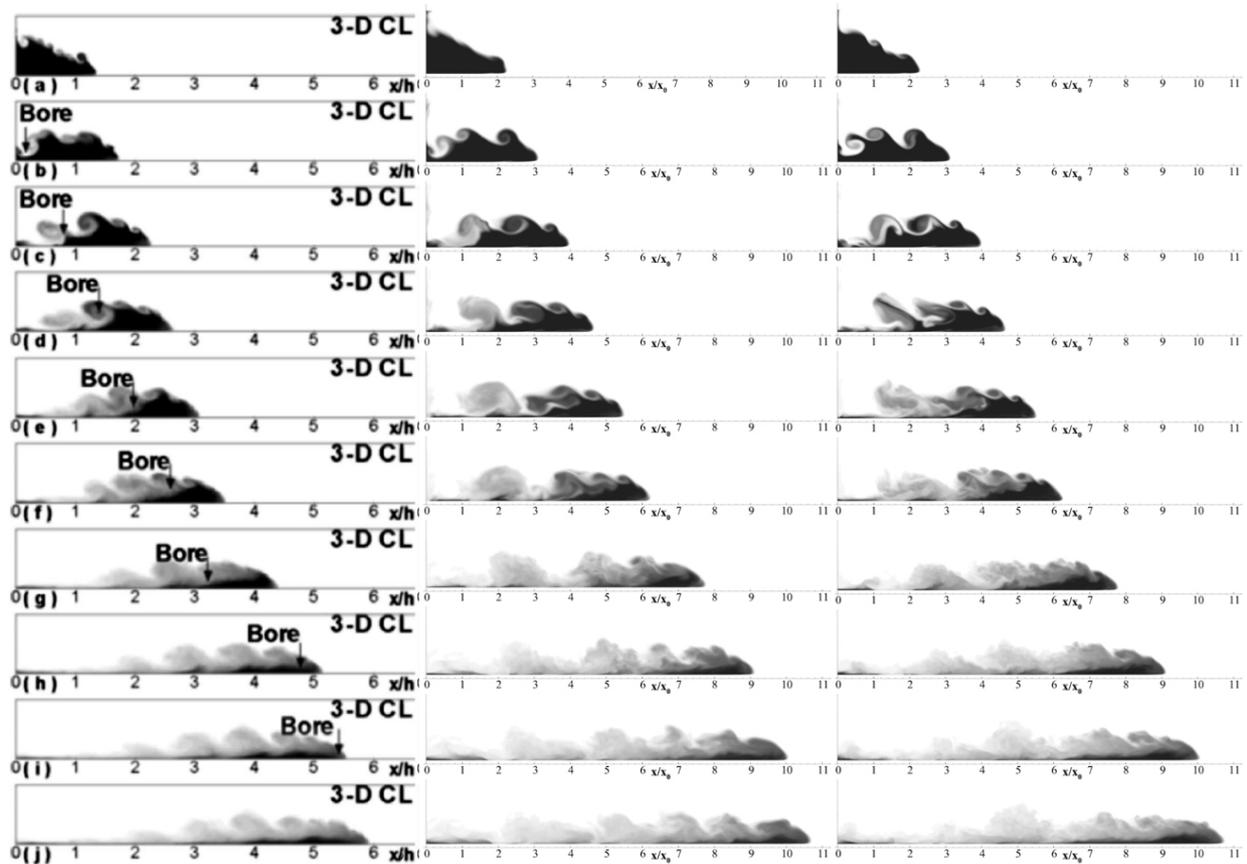


Fig. 5. Time evolution of the gravity current case C2 numerically predicted by [left] LES on a mesh of 35.4×10^6 computational cells by Ooi *et al.* (2006); [center and right] two present solutions computed on C2c mesh (3.1×10^6 cells) and C2f mesh (7.3×10^6 cells), respectively, at selected times, as Fig. 2

LRN-모형에 의해 구해진 와점성값보다 약 10배 이하로 작게 산정되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 하이브리드 모델링은 대부분의 영역에서 LES 모드로 수행되었음을 나타낸다.

다음은 Ooi *et al.* (2006)이 수행한 LES 결과와 이 연구에서 구한 수치모의 결과를 Fig. 5와 같이 중력류 C2에 대해서 비교하였다. 여기서 주목할 것은 LES에 사용된 계산셀의 수는 본 연구에서 수행한 C2c와 C2f 모의에서 적용한 계산셀보다 각

각 약 11배와 5배 많다. 아울러 LES에서는 필요한 계산셀의 수를 줄이기 위해서 수로의 양 측벽을 벽(solid walls)로 고려하지 않고 주기경계조건(periodic boundary conditions)을 적용했음을 알아둘 필요가 있다. Paik *et al.* (2009)에서도 언급되었듯이, LES는 많은 계산셀을 이용하였지만, 양 측벽의 주기경계조건 처리로 벽 근처에서 발생하는 큰 와의 붕괴와 이로 인한 중력류와 주변류의 증가된 혼합을 과소산정하고 있다. 이 연구에서 수행한 C2c와 C2f 수치모의 모두 전반부에서는 Ooi *et al.* (2006)의 LES 결과에 준하는 결과를 도출하고

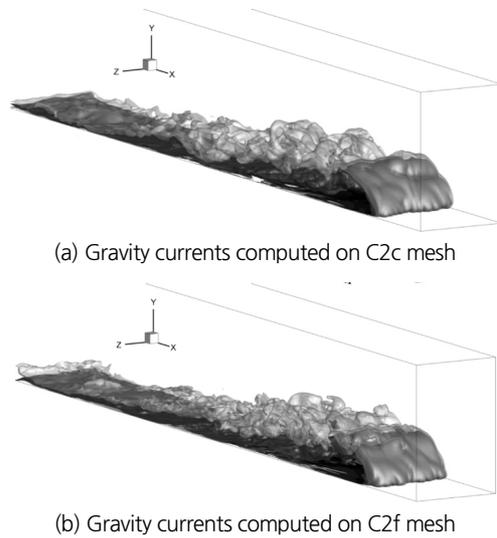


Fig. 6. Gravity current C2 visualized by three isosurfaces of $\rho_0 + 0.2\Delta\rho$, $\rho_0 + 0.5\Delta\rho$ and $\rho_0 + 0.8\Delta\rho$ computed at $t = 19.26$ s on two successively refined meshes

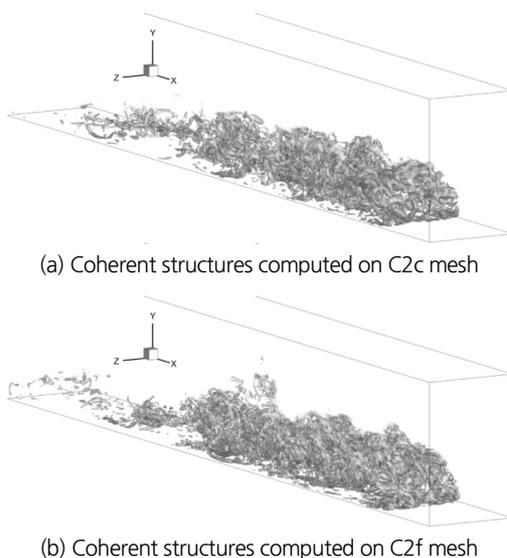


Fig. 7. Coherent structures visualized by isosurface of q -criterion for gravity current C2 computed, as Fig. 6

있으며, 계산시간 후반부에는 양 측벽을 비활(no-slip)조건으로 처리함으로써 벽 근처에서 난류의 감쇄를 동반한 와 붕괴를 합리적으로 예측하여 특히 조밀격자에서 수행한 C2f 해석 결과는 실험에서 관측된 중력류의 거동을 높은 정확도로 예측하고 있음을 알 수 있다.

수치모의로 재현된 중력류의 3차원적 거동 그리고 난류조직구조의 발달 특성을 분석하기 위해서 밀도 증가곡면과 q -기준값의 증가곡선으로 중력류 C2의 구조를 제시하면 Figs. 6 and 7에서와 같다. 중력류는 하류로 이동하면서 중력류 머리(head) 부분 경계면을 따라서 지속적으로 K-H 형식의 와가 발생하고 머리 뒤 중력류 꼬리(tail)부분에서는 와가 3차원적으로 붕괴되는 현상을 볼 수 있다. 아울러, 머리부분 선단부에서는 횡방향으로 울퉁불퉁하게 3차원적으로 중력류가 불안정화되는 L-C 구조를 형성하게 된다. 아울러 재현된 난류조직구조를 보면 LRN-난류모형을 적용할 때 재현하지 못했던 와 붕괴 현상(즉, 중력류 머리부분 경계면에서 발달한 큰 와가 시간이 지남에 따라 작은 와로 붕괴되면서 난류에너지가 소산되는 현상)을 이 연구에서 구축한 수치모델링 기법으로 우수하게 재현하는 것으로 나타났다. 이러한 중력류의 3차원 구조의 거동은 C2c와 C2f 수치모의 모두에서 잘 재현되는 것으로 나타났다. 이 결과는 이 연구에서 적용한 하이브리드 RANS/LES 기법이 유사한 격자해상도에서 기존 LRN-난류모형을 이용하여 구한 결과의 한계를 극복하고 중력류의 거동을 보다 잘 재현함을 보여주는 것이다.

5. 결론

중력류 해석을 위해서 기존 수치모델링 기법들이 이용한 지배방정식인 밀도(또는 농도) 수송방정식을 고려하지 않고, 가벼운 주변 유체, 중력류를 구성하는 상대적으로 무거운 유체 그리고 자유수면 위에서 흐르는 공기를 각각의 상으로 고려하는 다상흐름 모델링 기법을 구축하여 중력류를 수치적으로 해석하였다. 기존 RANS 수치모의의 정확도 한계와 계산량이 많이 요구되는 LES의 단점을 보완할 수 있는 하이브리드 RANS/LES 기법을 적용하여 중력류 발달에 중요한 난류의 영향을 고려하였다. 사각형 수로에서의 중력류를 수치모의하고 결과를 실험 관측값과 함께 기존 RANS 및 LES 결과와 비교분석하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

다상흐름 수치모의 기법은 난류에너지 소산에 영향을 주는 부력효과와 관련있는 경험적 난류 매개변수를 고려하지 않으면서 공학적으로 접근 가능한 해상도의 계산격자를 이용

하여 우수한 정확도로 중력류를 해석할 수 있음을 수치모의를 통해 보여주었다.

적용한 수치모델링 기법은 중력류의 전파속도 그리고 Kelvin-Helmholtz 와 발달 그리고 L-C 구조의 3차원적 거동 특성을 상대적으로 낮은 격자해상도에서 LES와 비교할 만한 수준으로 양호하게 예측하는 것으로 나타났다.

LRN-난류모형을 이용하는 RANS 기법이 재현할 수 없었던 와붕괴 현상을 하이브리드 RANS/LES 기법은 RANS 수치모의에서 적용한 격자해상도에서 LES 모드의 수치해석 정확도로 중력류의 경계면을 따라 발생하는 와 그리고 이 와들이 붕괴되면서 작은 난류구조로 분할하면서 난류에너지가 소산되는 현상을 잘 재현할 수 있는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 다상흐름 해석기법과 하이브리드 난류 모델링 기법을 결합하여 중력류를 성공적으로 재현할 수 있음을 보여주었다. 이 연구 기법은 하천에서 저수지로 유입되는 그리고 하천으로부터 해안으로 유입되는 오염물질과 탁류의 거동을 해석하는데 유용하게 활용될 수 있으며, 추후 복잡한 현장 지형조건을 고려한 연구를 통해 모형의 적용성을 확립하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 개인연구 사업임(NRF-2019R1A2C1090809).

References

- Benjamin, T. B. (1968). "Gravity currents and related phenomena." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 31, No. 2, pp. 209-248.
- Bournet, P. E., Dartus, D., Tassin, B., and Vincon-Leite, B. (1999). "Numerical investigation of plunging density current." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 6, pp. 584-594.
- Britter R. E., and Simpson, J. E. (1981). "A note on the structure of the head of an intrusive gravity currents." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 112, pp. 459-466.
- Cantero, M. I., Lee, J. R., Balachandar, S., and Garcia, M. H. (2007). "On the front velocity of gravity currents." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 586, pp. 1-39.
- Choi, S., and Garcia, M. H. (2002). "k- ϵ turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 55-63.
- Choi, S.-U., Kang, H., Yu, K., Paik, J., and Lee, S.-O. (2017). *Hydraulics of turbulent flows*, CIR.
- Dai, A. (2013). "Experiments on gravity currents propagating on different bottom slopes." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 731, pp. 117-141.
- Eidsvik, K. J., and Brors, B. (1989). "Self-accelerated turbidity current prediction based upon k- ϵ model turbulence." *Continental Shelf Research*, Vol. 9, pp. 617-627.
- Gritskevich, M. S., Garbaruk, A. V., Schütze, J., and Menter, F. R. (2012). "Development of DDES and IDDES formulations for k- ω the shear stress transport model." *Flow Turbulence and Combustion*, Vol. 88, No. 3, pp. 431-449.
- Hacker, J., Linden, P. F., and Dalziel, S. B. (1996). "Mixing in lock-release gravity currents." *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 24, No. 1-4, pp. 183-195.
- Hallworth, M. A., Huppert, H. E., Phillips, J. C., and Sparks, R. S. J. (1996). "Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 308, pp. 289-311.
- 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." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 418, pp. 189-212.
- Huang, H., Imran, J., and Pirmez, C. (2005). "Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 283-293.
- Huppert, H. E. (2006). "Gravity currents: a personal perspective." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 554, pp. 299-322.
- Inghilesi, R., Adduce, C., Lombardi, V., and Roman, F. (2018). "Axisymmetric three-dimensional gravity currents generated by lock exchange." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 851, pp. 507-544.
- Klemp, J. B., Rotunno, R. and Skamarock, W. C. (1994). "On the dynamics of gravity currents in a channel." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 269, pp. 169-198.
- Lee, W. D., and Hur, D.-S. (2014). "Development of 3-D hydrodynamical model for understanding numerical analysis of density current due to salinity and temperature and its verification." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 3, pp. 859-871.
- Lee, W. D., Mizutani, N., and Hur, D. S. (2018). "Behavior characteristics of density currents due to salinity differences in a 2-d water tank." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 32, No. 4, pp. 261-271.
- 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." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 584, pp. 433-453.
- Menter, F. R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
- Nasr-Azadani, M. M., and Meiburg, E. (2014). "Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 745, pp. 409-443.
- Ooi, S. K., Constantinescu, G., and Weber, L. J. (2006). *Numerical simulation of lock-exchange gravity driven flows*. IIHR Technical Rep., No. 450, University of Iowa, Iowa City, Iowa.

- OpenFOAM (2018). *OpenFOAM - The open source CFD toolbox 1812 User's Guide*.
- Paik, J., Eghbalzadeh, A., and Sotiropoulos, F. (2009) "Three-dimensional unsteady RANS modeling of discontinuous gravity currents in rectangular domains." *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 6, pp. 505-521.
- Patterson, M. D., Simpson, J. E., Dalziel, S. B., and van Heijst, G. J. F. (2006). "Vortical motion in the head of an axisymmetric gravity current." *Physics of Fluids*, Vol. 18, p. 046601.
- Schiller, L., and Nauman, A. (1935). "A drag coefficient correlation." *VDI Zeitung*, Vol. 77, pp. 318-320.
- Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., and Travin, A. K. (2008). "A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities." *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 6, pp. 1638-1649.
- Simpson, J. E. (1997). *Gravity currents in the environment and the laboratory*, 2nd ed. Cambridge University Press, New York.
- Spalart, P. R., and Allmaras, S. R. (1994). "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows." *La Rech. Aerospaciale*, Vol. 1, pp. 5-21.
- Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. K., and Travin, A. (2006). "A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities." *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 20, pp. 181-195.
- Steenhauer, K., Rokyay, T., and Constantinescu, G. (2017). "Dynamics and structure of planar gravity currents propagating down on inclined surface." *Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 3, p. 036604.
- Strelets, M. (2001). "Detached eddy simulation of massively separated flow." *AIAA Journal*, pp. 1-18.
- Sutherland, B. R., Kyba, P. J., and Flynn, M. R. (2004) "Intrusive gravity currents in two-layer fluids." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 514, pp. 327-353.
- Ungarish, M. (2007). "A shallow-water model for high-Reynolds-number gravity currents for a wide range of density differences and fractional depths." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 579, pp. 373-382.
- Zgheib, N., Ooi, A., and Balachandar, S. (2016). "Front dynamics and entrainment of finite circular gravity currents on a unbounded uniform slope." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 801, pp. 322-352.