

댐 붕괴 유동에 미치는 표면 거칠기와 난류강도 변화의 영향 연구

박일룡^{1,†} · 정광호¹
동의대학교 조선해양공학과¹

Study on the Effects of Surface Roughness and Turbulence Intensity on Dam-break Flows

Il-Ryong Park^{1,†} · Kwang-Hyo Jung¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University¹

Abstract

Dam-break flows, a type of very shallow gravity-driven flow, are substantially influenced by resistance forces due to viscous friction and turbulence. Assuming turbulent flow, the main focus of this study is to validate the increase of drag forces caused by surface roughness and especially turbulence intensity. A Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) approach with the standard $k-\epsilon$ turbulence model is used for this study, where the free surface motion is captured by using a volume of fluid(VOF) method. Surface roughness effects are considered through the law of the wall modified for roughness, while the initial turbulence intensity which determines the lowest level of turbulence in the flow domain of interest is used for the variation of turbulence intensity. It has been found that the numerical results at higher turbulence intensities show a reasonably good agreement with the physical aspects shown by two different dam-break experiments without and with the impact of water.

Keywords : Dam-break flow(댐붕괴 유동), Surface roughness(표면 거칠기), Turbulence intensity(난류 강도), VOF method(VOF 방법), Validation(검증), Free surface(자유수면)

1. 서론

댐붕괴(dam-break) 문제는 문제의 단순한 특성에도 불구하고 선박해양공학 및 연안공학 분야에서 그 응용성이 높기 때문에 현재까지 실험과 이론적 방법을 통해 많이 연구되고 있다. 선박해양공학 분야에서 대표할 만한 관련 연구로는 먼저, 그린워터(green water)에 의한 유체 충격력을 추정하기 위한 Zhou, et al. (1999)의 댐붕괴 실험 연구가 있다. 다음으로, 보다 체계적으로 갑판 침수 과정과 갑판 상부 구조물의 수직 벽에 대한 유체 충격력 변화를 이론과 댐붕괴 실험으로 분석한 Greco, et al. (2005)의 연구가 있다. 수치 해석적 관점에서는 많은 다양한 자유수면 해석 기법들이 검증용 벤치마크 데이터로 댐붕괴 실험 결과를 활용하고 있다(Park, et al., 2005; Kim, et al., 2007; Shin, et al., 2010; Park, et al., 2010; Kim, et al., 2011). 한편, Colagrossi and Landrini (2003)는 검증된 다양한 수치 해석 기법들이 댐붕괴 문제에서 실험 결과와 일관성 있는 차이를 보여준다는 사실을 밝혔다. 그리고 그 원인으로 실험의 초기 조건에 대한 불확실한 정보와 실험 계속 값에 포함된 불확실성 오차 외 수치 해석에서 고려되지 않은 또는 과소 평가되는 어떤 물리적 조건일 수 있을

을 설명하였다. 실제로 이와 관련하여 Violeau and Issa (2007)는 앞선 연구들과는 다른 새로운 댐붕괴 실험을 대상으로 자유수면 형상 변화 과정에 대해 난류를 고려한 수치 해석을 수행하였다. 여기서, 저자들은 향후 보다 체계적인 검증 연구가 필요하지만 난류 강도(turbulence intensity)가 자유수면 형상 변화에 미치는 영향이 클 수 있음을 논하였다.

본 논문의 목적은 Colagrossi and Landrini (2003)와 Violeau and Issa (2007)의 연구 결과를 바탕으로 하여 댐붕괴 문제와 같이 수심이 매우 낮은 천수(shallow water) 자유수면 유동에서 표면 거칠기(surface roughness)와 특히 난류 강도에 의한 저항 증가 영향이 지배적임을 밝히고자 하는데 있다. 수치 해석은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)시뮬레이션을 기반으로 수행되었으며, 자유수면의 움직임은 검증된 Park, et al. (2009)의 VOF(Volume Of Fluid)방법을 사용하여 구하였다. 수치 해석 결과에 대한 검증은 잘 알려진 두 가지 댐붕괴 실험을 통해 이루어졌다. 먼저 Martine and Moyce (1952)의 실험 조건을 통해 댐붕괴 이후 물의 흐름 속도에 대한 표면 거칠기와 난류 강도의 영향을 고찰하고, 다음으로 자유수면의 수위(water level)와 유체 충격에 의한 압력 계측 결과를 제공하는 Zhou, et al. (1999)의 실험을 통해 본 논문의 결과를 재차 검증하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배방정식 및 이산화 방법

댐붕괴 유동은 유체의 표면장력의 영향을 무시한 비압축성 (incompressible) 2상 유동(two-phase flow)으로 해석되며 이 때 지배방정식인 연속(continuity)방정식과 RANS방정식은 다음과 같다.

$$\int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \\ - \int_S p \mathbf{i}_i \cdot \mathbf{n} dS + \int_S \tau_{ij} \mathbf{i}_i \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} \rho g_i d\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \mathbf{v} 와 u_i 는 속도벡터이고, \mathbf{n} 은 유동장 경계면 S 에 대한 법선벡터(normal vector), Ω 는 검사체적(control volume), t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력을 각각 나타낸다. τ_{ij} 는 유체의 점성과 난류에 의한 유효응력(effective stress)을 표시하며, g_i 는 중력 가속도이다.

지배방정식에 대한 수치 해는 2차 정도의 Three-Time-Level 방법을 시간 적분법으로 하는 유한체적법(finite volume method)으로 구해진다(Ferziger & Perić, 1996). 여기서, 지배방정식의 대류항과 확산항은 각각 3차 정도의 MUSCL (Monotonic Upstream centered Scheme for Convection Laws; Van Leer, 1979)방법과 2차 정도의 중앙 차분법(central difference scheme)으로 이산화된다. 연속방정식을 만족시키기 위한 속도-압력의 연성은 SIMPLE (Ferziger & Perić, 1996)알고리즘을 통해 수행된다.

2.2 자유수면 모델링

본 논문에서 자유수면 유동 해석 기법으로 Park, et al. (2009)의 VOF법을 사용하였다. 본 방법은 CICSAM(Ubbink & Issay, 1999)과 비슷한 해의 정확도를 가지며 비정상 자유수면 문제 해석에 적합하다. 단, 본 기법이 가지는 정확도를 유지하기 위해서는 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)조건이 0.4이하의 값으로 유지되는 것을 권장한다(Tsui, et al., 2009).

2.3 표면 거칠기 및 난류 강도 모델링

난류 유동 해석을 위해 표준 k-ε 모델과 함께 벽함수(wall function) 기법(Launder & Spalding, 1974) 그리고 경계층 부근의 유동 변화를 충분히 해상할 수 있도록 벽면 근방으로 비교적 두터운 격자 층을 사용하였다. 벽면에서 표면 거칠기와 유동장의

난류 강도를 조절하기 위해 다음의 비교적 간단한 방법을 사용하였다.

표면 거칠기는 난류 유동 해석 시 사용될 수 있는 벽면 경계 조건 처리법인 벽함수를 수정하는 접근법으로 다음과 같이 고려된다.

$$\frac{\rho U_P u_\tau}{\tau_w} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{u_\tau y_P}{\nu} \right) - \Delta B \quad (3)$$

여기서, U_P 는 벽면에 바로 근접한 계산점 P 에서의 벽면과 평행한 속도 값이고, u_τ 는 벽면 마찰 속도(wall friction velocity)로 $u_\tau = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$ 로 정의되며, τ_w 는 벽면 전단 응력(wall shear stress)이며, 실험 상수 κ 와 E 는 각각 0.41 그리고 9.793의 값이 사용되었다. ν 는 동점도(kinematic viscosity) 그리고 y_P 는 계산점 P 에서 벽면까지 거리를 나타낸다. 이 식은 Nikuradse (1933)의 파이프 유동 실험에서 파이프 표면 모래의 거칠기로 나타낸 식으로서, ΔB 는 모래의 거칠기를 나타내는 모래 표면의 높이 K_S 에 대해 무차원화된 거칠기 값, $K_S^+ = K_S u_\tau / \nu$ 의 함수이다.

$$\Delta B = \quad (4)$$

$$\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{K_S^+ - 2.25}{87.75} + C_S K_S^+ \right) \sin(0.4258 (\ln K_S^+ - 0.811))$$

여기서, C_S 는 거칠기 상수를 나타낸다 ($C_S=0.5$). Cebeci and Bradshaw (1977)는 다음과 같이 표면 거칠기를 정의하였다: 유체역학적으로 부드러운 표면($K_S^+ < 2.25$), 천이 영역($2.25 \leq K_S^+ \leq 90$), & 완전히 거친 표면($K_S^+ > 90$).

난류 강도에 대해서는 초기 조건으로 입력해야 할 유동장의 최소 난류 강도를 결정하는 초기 난류 강도 값을 조정하는 방법을 통해 변화를 주었다. 최소 난류 강도를 결정하는 초기 난류 강도 설정식은 다음과 같다.

$$k_{ini} = \frac{2}{3} (U_c I)^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ini} = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\lambda} \quad (6)$$

여기서, k_{ini} 와 ε_{ini} 는 각각 초기 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy)와 난류 소산율(turbulent dissipation rate)을 나타내며, U_c 는 유동장을 대표하는 속도 값(reference velocity)으로 댐붕괴 문제의 경우 $U_c = 2(gh)^{1/2}$ 로 주어진다. 식에서 h 는 초기 물 기둥(water column)의 높이를 나타낸다. I 는 난류 강도 값을, λ 는 난류 길이 척도(turbulent length scale) 값으로, 본 논문에서는 Cox, et al. (1994)의 결과를 바탕으로 $0.04d$ 를 사용하였으며, 식에서 d 는 물 깊이를 나타낸다. 난류 상수인 C_μ 는 0.06으로 두었다.

3. 수치 해석 결과

수치 해석은 앞서 서론에서 언급하였듯이 주로 흘러간 물의 이동 거리를 예측한 Martine and Moyce (1952)의 실험과 탱크 내 물기둥의 붕괴 후 자유수면의 수위와 벽면의 압력 변화를 예측한 Zhou, et al. (1999)의 실험에 대해 각각 수행하였다. Fig. 1은 댐붕괴 문제에 대한 초기 물기둥의 형상과 탱크 내 수위와 압력을 예측한 위치를 설명하고 있다. 각각의 실험 조건은 Martine and Moyce (1952)의 경우 $h=l=0.057m$ 이고 Zhou, et al. (1999)의 실험은 $h=0.6m, l=1.2m$ 의 조건을 가진다. 여기서 유동장의 크기는 $H/h=3.33$ 그리고 $L/h=5.37$ 의 조건을 가진다. 특별히, H1, H2, P2는 Zhou, et al. (1999)의 실험에서 각각 수위와 압력을 예측한 지점을 나타낸다.

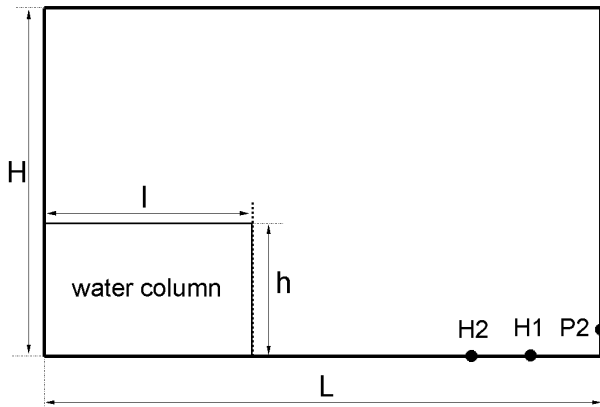


Fig. 1 Dam-break problem: definition and measurement points for water heights and pressure

먼저 Martine and Moyce (1952)의 실험에 대해 초기 난류 강도 값은 $I=1\%$ 로 고정하고 탱크 바닥의 표면 거칠기, $K_s^+ = 30$ & 80 에서 예측된 시간에 따른 흘러내린 물의 선두 끝 단의 위치 변화를 살펴보았다. 다음으로 유동장의 최소 난류 강도를 결정하는 초기 난류 강도 값을 각각 $I=1\%, 3\%, 5\%, 7\%, 15\%$ 그리고 20% 으로 변화시키면서 Martine and Moyce (1952)의 실험에 대해 흘러가는 물의 속도 변화를 고찰하였다. 마지막으로 Zhou, et al. (1999)의 댐붕괴 실험을 수치 시뮬레이션 한 후 난류 강도 변화가 수위 변화와 유체 충격으로 인한 탱크 내 압력변화에 미치는 영향을 고찰하였다.

3.1 수치 격자

본 논문에서 다루는 문제는 저자의 선행 연구 논문 Park, et al. (2009)에서 다룬 수치 해석 기법 검증 문제와 동일하며, 체계적인 격자 수 변화를 통해 자유수면 해의 격자 의존성을 검증한 바 있다. 이러한 검증 결과를 바탕으로 본 논문에서는 Park, et al. (2009)이 사용한 가장 조밀한 격자 336×224 를 사용하였다. 이 격자의 특징은 Fig. 1의 탱크 바닥과 오른쪽의 벽면으로부터 유동장으로 높이의 5%에 해당하는 영역에 60개의 격자를 집중

분포하여 경계층 부근에서 자유수면의 변화를 충분한 조밀도로 해석할 수 있도록 한 것이다. 이 때 타당한 벽함수 적용을 위해 벽면으로부터 첫 격자의 계산점까지의 무차원 거리값 $y^+ (=u\tau/\nu) \approx 60$ 로 설정하였다.

마지막으로 모든 계산에서 Courant수는 0.25의 값이 유지되도록 하였다.

3.2 표면 거칠기 변화

Fig. 2는 실험과 수치 해석 사이의 댐붕괴 이후 시간에 대해 물이 흘러간 거리를 서로 비교하고 있다: SPH(Smooth Particle Hydrodynamics), Colagrossi and Landrini (2003); BEM (Boundary Element Method), Greco, et al. (2004); LSM(Level-Set

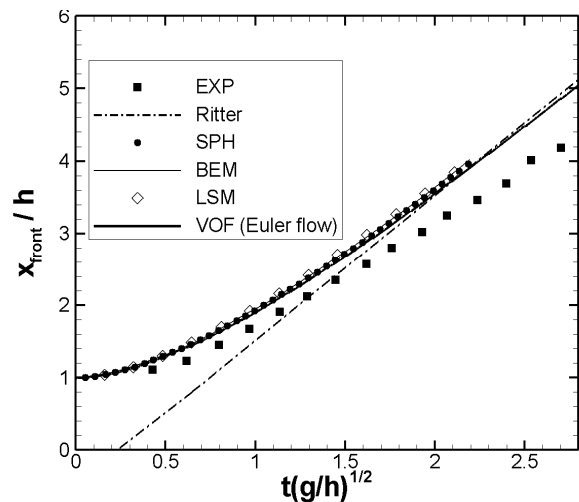


Fig. 2 Comparison of the water front propagation between the experimental data and the theoretical solution and the numerical solutions

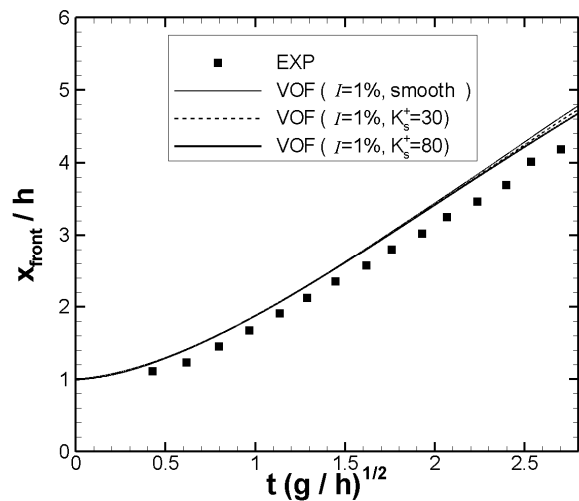


Fig. 3 Comparison of the water front propagation between the numerical solutions with varying surface roughness and the experimental data

Method), Colicchio, et al. (2002). 여기서, VOF Euler flow는 점성을 고려하지 않은 본 연구의 수치 해석 결과를 나타낸다. 그림은 서론에서도 언급하였듯이 점성을 고려하거나 그렇지 않은 수치 기법들의 결과 모두에서 물이 흘러가는 속도가 실험보다 빠르다는 것을 설명하고 있다. 즉, 수치 해석에서 고려되지 않은 또는 과소평가되고 있는 물리 현상이 댐붕괴와 같은 낮은 수심의 자유수면 유동에서 주요한 저항의 요소가 되고 있음을 보여준다. 물론 해의 수치확산(numerical diffusion) 오차 등으로 인해 이 값이 저항으로 작용하여 일부 실험과 비슷한 양상을 보여주는 수치 해석 결과를 문헌에서 찾아볼 수 있다. 본 절에서는 실제 실험에서는 표면 거칠기의 정보가 제공되고 있지 않지만, 일반적으로 공학적 실험에서 가질 수 있는 거칠기 영역의 값을 고려하여 표면 거칠기 정도가 물이 흘러가는 속도에 미치는 영향을 보고자 한다.

Fig. 3은 Martine and Moyce (1952)의 실험과 Ritter (1892)의 이론 해 그리고 표면 거칠기를 주지 않은 수치 해와 $K_s^+ = 30$ & 80의 표면 거칠기 조건에서 계산된 결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 표면 거칠기의 영향이 두드러지는 시점은 붕괴된 물이 가속을 받아 속도가 다소 높아지는 무차원 시간 약 1.5 이후인 것을 볼 수 있다. 즉, 표면 거칠기로 인한 저항 효과가 존재하나 댐붕괴 바로 이후부터 나타나는 실험과 보이는 차이와 전반적인 정량적 차이에 대한 주요 원인은 아닌 것으로 판단된다. 다만, 다소 긴 거리를 흘러가는 자유수면 유동에 대해서는 표면 거칠기의 영향이 중요한 저항 요소의 하나가 될 수 있음을 본 결과를 통해 확인할 수 있다.

3.3 난류 강도 변화

3.3.1 Martine & Moyce의 실험

Fig. 4는 Martine and Moyce (1952)의 실험 결과와 이론 해에 대해 초기 난류 강도 값 $I=1\%$, 3% , 5% , 7% , 15% 그리고 20% 에 대한 각 수치 해석 결과들을 서로 비교하고 있다. 난류 강도가 큰 $I=20\%$ 의 결과가 실험의 계측 값과 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 우선, Violeau and Issa (2007)의 결과를 고찰해 볼 때, 더 체계적인 검증이 필요하지만, 그들의 논문에서 높은 난류 강도를 예측한 수치 해석 결과가 실험의 결과와 보다 잘 일치함을 보였다. 구체적으로, 난류 강도의 증가는 유동장 내 유효응력의 증가, 즉 확산의 증가로 이어지며 자유수면의 움직임의 활성도가 다소 낮아진 수치 결과가 실험의 자유수면 움직임과 잘 일치하였다. 마찬가지로 난류 강도로 인한 유효응력의 증가는 유동장 내 확산은 물론 벽면 근처에서의 저항의 증가를 야기한다. 이는 댐붕괴 문제와 같이 물의 깊이가 매우 얇은 영역에서 이동하는 물의 흐름에 대한 저항 증가 요인으로 작용하며 함께 자유수면 거동의 양상을 바꿀 수 있다. Fig. 4의 결과를 통해 볼 때, 실제 댐붕괴 실험에서 유동의 난류 강도는 다소 크며, 수치 해석은 이러한 물리적 사실을 충분히 반영하여야 실험 결과와 타당한 일치를 보

는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 흘러가는 물 끝단의 속도를 이론값과 비교하고 있다. 점성이 고려되지 않은 VOF Euler 결과는 시간이 증가하면서 이론값에 접근하고 있어 점성에 의한 저항 요소가 없는 경우에 대한 유동 현상을 타당성 있게 잘 보여주고 있다. 난류 강도가 큰 경우 유속은 무차원 시간 1.5를 지나면서 저항에 의해 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다.

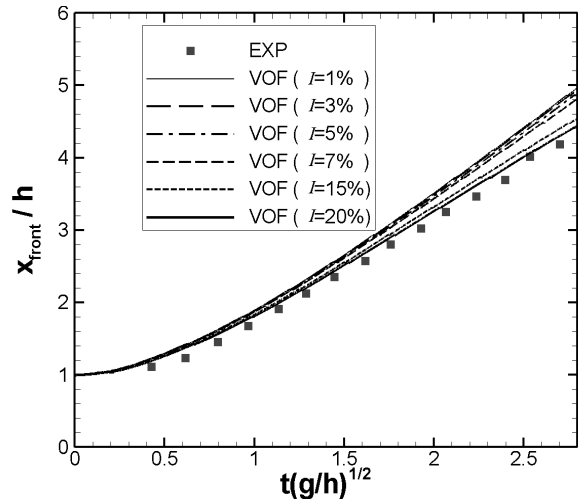


Fig. 4 Comparison of the water front propagation between the numerical solutions with varying turbulence intensity and the experimental data

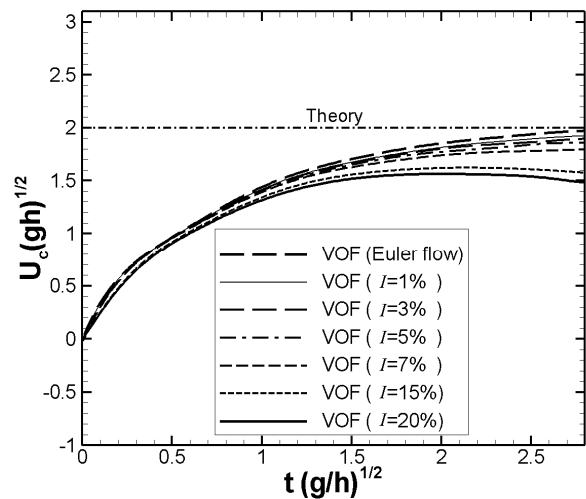


Fig. 5 Comparison of the velocity of the water front toe between the numerical solutions with varying turbulence intensity and the experimental data and the theoretical solution

3.3.2 Zhou, et al.의 실험

본 절은 Martine and Moyce (1952)의 실험에 대한 본 연구 결

과를 바탕으로 난류 강도의 댐붕괴 유동에 대한 영향을 유체 충격 현상을 고려하는 Zhou, et al. (1999)의 실험에 대해 재차 검증한 결과를 정리하고 있다. 특히, 높은 난류 강도에서 저항의 영향이 크게 증가되었을 때 물의 충격으로 인한 유동장 내 압력 변화를 실험 결과와 비교하는 것에 초점을 두고자 한다.

Fig. 6(a)와 (b)는 Fig. 1에서 설명한 H1, H2 위치에서 예측한 수위를 비교하고 있다. 먼저, Colagrossi and Landrini (2003)가 지적하였듯이 수위 예측에서 실험의 오차도 무시할 수 없으며,

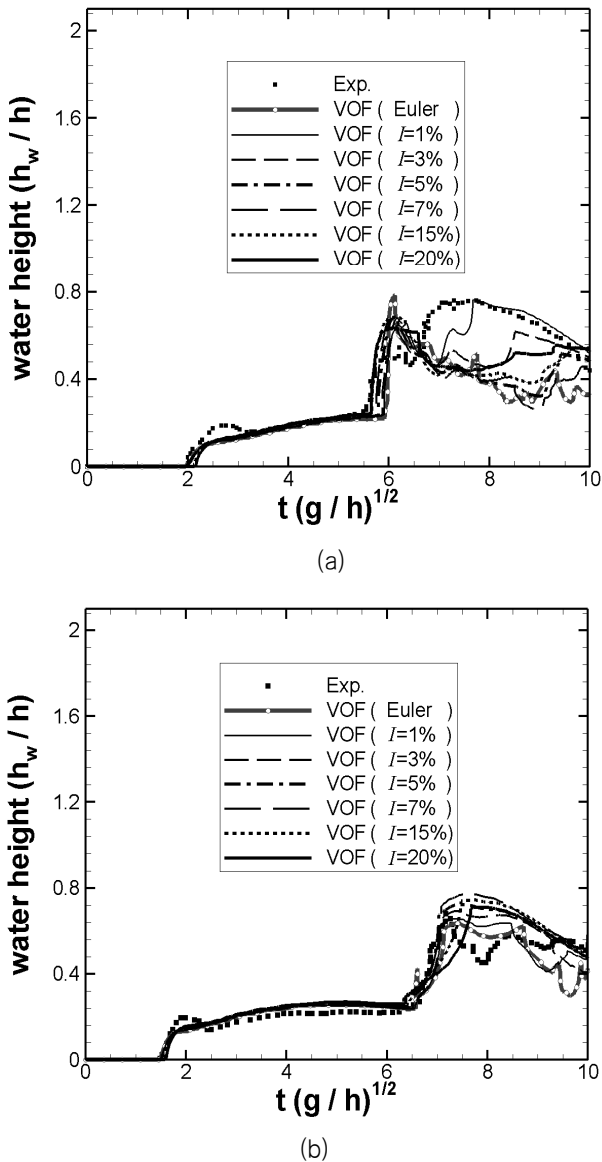


Fig. 6 Comparison of the water level at two measurement points: (a) H1 and (b) H2

특히 H1의 지점에서 무차원 시간 6.0 이후 물속에 생성된 버블 (bubble)의 복잡한 형상 변화 및 이동 속도의 변화가 수위 값 예측 결과에 미치는 영향을 무시할 수 없을 것으로 판단된다. 실험의 경우 1m 상당의 탱크 폭을 가지므로 버블의 형상과 거동이

3차원 효과로부터 완전히 자유로울 수 없으며, 이로 인해 2차원 문제로 가정된 본 수치 해석의 서로 다른 난류 강도 값에 대한 결과들이 Fig. 6(a)의 그림에서 볼 수 있듯이 실험 결과와 차이를 보이는 것으로 판단된다. 이 시간 영역을 제외하고 본 수치 해석 결과는 실험과 타당한 일치성을 보여주고 있으며, 특히 H2 위치에서 난류 강도 변화에 따른 수위 변화가 크지 않아 비교적 서로 잘 일치하고 있다.

Fig. 7은 Fig. 1에서 설명한 P1위치에서 예측된 압력의 시간 변화를 비교하고 있다. 본 비교의 주안점은 유체 충격으로 인한 무차원 시간 6.0 근방에서 발생한 높은 압력 수치와 이 현상이 발생하는 시간 예측에 대한 정확도이다. 비점성(inviscid) 결과를 포함하여 낮은 난류 강도에서는 압력 값을 다소 과대 예측하고 있으며, 시간도 실제 실험에 대해 위상 차를 보이고 있다. 반면, 높은 난류 강도에 대한 수치 해석 결과는 압력과 시간 모두에 대해 만족스러운 일치를 보여주고 있다.

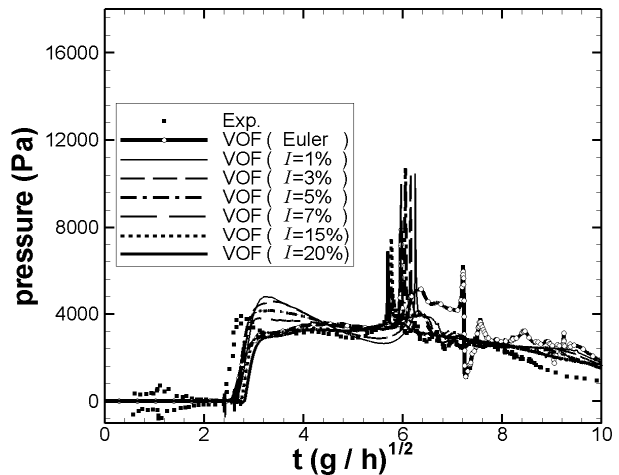


Fig. 7 Comparison of the pressure at a measurement point, P2

Fig. 8(a), (b)와 (c)는 초기 난류 강도 $I=1\%$, 7% , 20% 의 조건에 계산된 자유수면과 유동장 내 압력에 대한 시간 변화를 비교하고 있다. 각각의 조건에서 바닥을 흐르는 물의 속도, 수직 벽을 오르는 물의 속도 및 높이, 플런징 쇄파(plunging break)현상, 자유수면 형상, 자유수면 아래 버블의 형상 및 거동 그리고 유동장 내 압력 모두 다소 다른 것을 볼 수 있다. 실험과 잘 일치한 $I=20\%$ 의 결과는 앞서 설명하였듯이, 난류 강도의 증가로 인한 저항 및 확산의 증가로 자유수면 유동이 비교적 덜 활성화된 것을 볼 수 있다.

4. 결론

수심이 매우 낮은 천수 자유수면 유동인 댐붕괴 문제에서 표면 거칠기와 난류 강도의 영향을 조사하기 위해 RANS법을 활용한 수치 해석 연구를 수행하였다. 여기서, 자유수면 운동 해석은

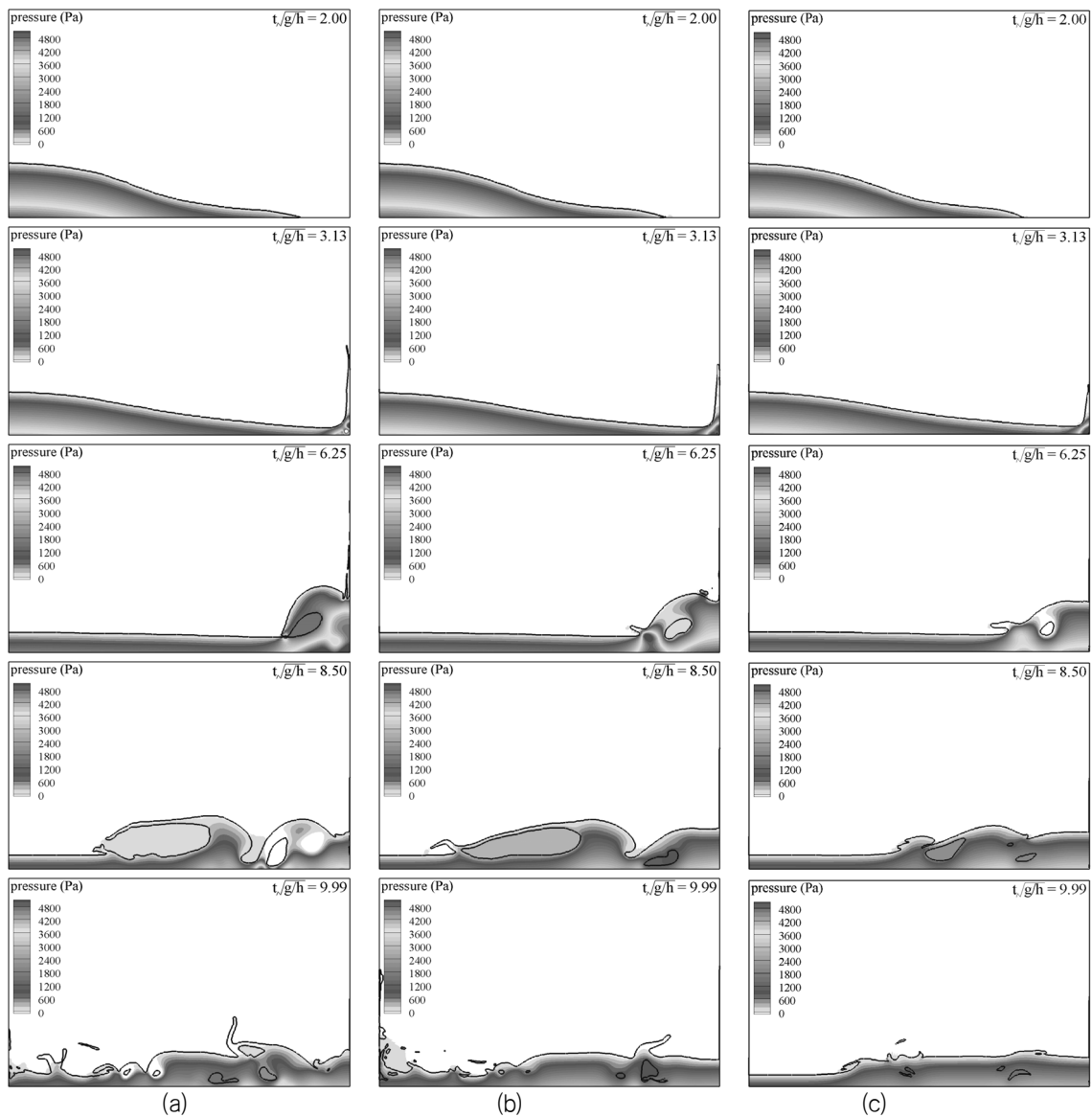


Fig. 8 Time sequence of the dam-break: (a) $F=1\%$; (b) $F=7\%$; and (c) $F=20\%$

VOF법을 이용하여 수행하였으며, 수치 해석 결과는 각각 다른 조건의 두 가지 댐붕괴 실험 결과를 통해 검증하였다.

Martine and Moyce (1952)의 댐붕괴 문제에서 흘러가는 물의 속도에 대한 표면 거칠기와 난류 강도 변화에 따른 저항 증가 현상을 확인하였으며, 무엇보다도 난류 강도의 영향이 지배적인 것을 볼 수 있었다. 높은 난류 강도에서 수치 해석 결과가 실험의 데이터와 잘 일치하였으며, 이는 실제 댐붕괴 실험의 유동은 다소 높은 난류 강도를 가지는 상태라 말할 수 있다. 이러한 난류 강도의 영향은 자유수면의 수위 변화는 물론, 유체 충격에 의한 압력 계측 결과를 제공하는 Zhou, et al. (1999)의 댐붕괴 실험에 대한 수치 해석 결과에서도 재차 검증되었다.

Violeau and Issa (2007)의 언급과 같이, 향후, 본 논문의 결과는 고차의 난류 모형을 활용한 체계적인 연구를 통해 더 검증

할 필요가 있는 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 2011년 동의대학교 일반연구과제사업(2011AA199)의 연구비 지원을 통해 작성되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

Cebeci, T. & Bradshaw, P., 1977. *Momentum Transfer in Boundary Layers*. Hemisphere publishing Corporation, New York.

- Colagrossi, A. & Landrini, M., 2003. Numerical Simulation of Interfacial Flows by Smoothed Particle Hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 191(2), 448–475.
- Colicchio, G. Colagrossi, A. Greco, M. & Landrini, M., 2002. Free-Surface Flow after a Dam Break: a Comparative Study. *Ship Technology Research*, 49(3), pp.95–104.
- Cox, D.T. Kobayashi, N. & Okayasu, A., 1994. Vertical variations of fluid velocities and shear stress in surf zones. *Proc. 24th Intl Conf. Coastal Engrg ASCE*, pp.98–112.
- Ferziger, J.H. & Peric, M., 1996. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer: Heidelberg.
- Greco, M. Faltinsen, O.M. & Landrini, M., 2005. Shipping of water on a two-dimensional structure. *Journal of Fluid Mechanics*, 525, pp.309–332.
- Greco, M. Landrini, M. & Faltinsen, O.M., 2004. Impact Flows and Loads on Ship-Deck Structures. *Journal of Fluids and Structures*, 19(3), 251–275.
- Kim, C.H. Lee, Y.G. & Jeong, K.L., 2011. A Study on the Numerical Simulation Method of Two-dimensional Incompressible Fluid Flows using ISPH Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.560–568.
- Kim, Y.I. Nam, B.W. & Kim, Y.H., 2007. Study on the Effects of Computational Parameters in SPH Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(4), pp.398–407.
- Lauder, B.E. & Spalding, D.B., 1974. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), pp.269–289.
- Martine, J.C. & Moyce, W.J., 1952. An Experimental Study of the Collapse Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plate. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A. Math., Phys. Eng. Sci*, 244, pp.312–324.
- Nikuradse, J., 1933. *Stromungsgesetze in rauhen Rohren*. Forschung Arb. Ing.-Wes. No. 361.
- Park, I.R. Kim, K.S. Kim, J. & Van, S.H., 2009. A Volume-Of-Fluid Method for Incompressible Free-Surface Flows. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61(12), pp.1331–1362.
- Park, I.R. Kim, K.S. Kim, J. & Van, S.H., 2010. Numerical Simulation of Free Surface Flow Using a Refined HRIC VOF Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.279–290.
- Park, I.R. Kim, W.J. Kim, J. & Van, S.H., 2005. A Study on a VOF Method for the Improvement of Free Surface Capturing. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.88–97.
- Ritter, A., 1892. Die Fortpflanzung der Wasserwellen: Z. *Vereines Deutsch. Ing*, 36(33), pp.947–954.
- Shin, S.M. Kim, I.C. & Kim, Y.G., 2010. Numerical Simulation of Free Surface Flows Using the Roe's Flux-difference Splitting Scheme. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(1), pp.11–19.
- Tsui, Y.Y. Lin, S.W. & Wu, T.C., 2009. Flux-blending schemes for interface capture in two-fluid flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(23–24), pp.5547–5556.
- Ubbink, O. & Issay, R.I., 1999. A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes. *Journal of Computational Physics*, 153(1), pp.26–50.
- Van Leer, B.J., 1979. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. V. A Second Order Sequel to Godunov's Method. *Journal of Computational Physics*, 32, pp.101–136.
- Violeau, D. & Issa, R., 2007. Numerical Modeling of Complex Turbulent Free-Surface Flows with the SPH Method: an overview. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53(2), pp.277–304.
- Zhou, Z.Q. De Kat, J.O. & Buchner, B., 1999. A nonlinear 3-D Approach to Simulate Green Water Dynamics on Deck. *Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Nantes, FRANCE. pp.5.1–1, 15.



박일룡



정광호