

댐 붕괴 유동에서 갇힌 공기의 압축성에 의한 물의 압력 진동 모사

신상묵
부경대학교 조선해양시스템공학과

Simulation of Pressure Oscillation in Water Caused by the Compressibility of Entrapped Air in Dam Break Flow

Sangmook Shin
Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National 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.

Pressure oscillation caused by the compressibility of entrapped air in dam break flow is analyzed using an open source code, which is a two-phase compressible code for non-isothermal immiscible fluids. Since compressible flows are computed based on a pressure-based method, the code can handle the equation of state of barotropic fluid, which is virtually incompressible. The computed time variation of pressure is compared with other experimental and computational results. The present result shows good agreements with other results until the air is entrapped. As the entrapped air bubbles pulsate, pressure oscillations are predicted and the pressure oscillations damp out quickly. Although the compressibility parameter of water has been varied for a wide range, it has no effects on the computed results, because the present equation of state for water is so close to that of incompressible fluid. Grid independency test for computed time variation of pressure shows that all results predict similar period of pressure oscillation and quick damping out of the oscillation, even though the amplitude of pressure oscillation is sensitive to the velocity field at the moment of the entrapping. It is observed that as pressure inside the entrapped air changes quickly, the pressure field in the neighboring water adjusts instantly, because the sound of speed is much higher in water. It is confirmed that the period of pressure oscillation is dominated by the added mass of neighboring water. It is found that the temperature oscillation of the entrapped air is critical to the quick damping out of the oscillations, due to the fact that the time averaged temperature inside the entrapped air is higher than that of surrounding water, which is almost constant.

Keywords : Entrapped air(갇힌 공기), Compressibility(압축성), Pressure-based method(압력 기반 기법), Equation of state(상태 방정식), Temperature variation(온도 변화)

1. 서론

슬로싱이나 수면입수 등의 급격한 자유표면 유동에서 기체가 고체 벽면이나 주위 액체에 의해 갇히는 경우 액체와 비갈 기체의 유동은 비압축성이지만 갇힌 기체에서는 압축성 효과가 발생할 수 있다. 갇힌 기체의 수축 팽창은 주위 액체의 압력 진동을 유발하여 고체 벽면의 진동을 초래한다. 수중 연소의 경우에도 후류 형상의 영향을 받는 동유체력 추정 과정에서 연소 가스의 압축성에 대한 고려가 필요하다. 공동의 경우 완전한 액체나 증

기와는 달리 혼합 상태에서의 음속이 대단히 낮기 때문에 공동 내부에 압축성 효과가 발생할 수 있다. 이러한 문제들에서는 외부 액체의 비압축성 유동과 갇힌 기체의 압축성 유동이 혼재되어 있어 수치해석에 많은 어려움이 있다.

비압축성 유동장 내부에 갇힌 기체의 압축성 효과에 대해 많은 연구 결과들이 보고되어 오고 있다. Park, et al. (2009)은 슬로싱에서 발생하는 갇힌 기체의 압축성 효과에 대한 실험을 수행하고 압축성 효과가 발생하는 유동 형태들에 대한 분류와 벽면 압력 변동에 미치는 영향을 보고하였다. Park and Lee (2008)는 발사관에서 압축공기를 이용하여 무장을 사출하는 과정에서 물

과 공기의 압축성이 고려된 유동 해석을 수행하고 압축성 효과로 인해 무장의 사출 가속도에 진동이 발생함을 보고하였다. Shin, et al. (2005, 2006)은 수중폭발 문제에서 움직이는 매질 경계면이 항상 특정 요소들의 검사표면으로 유지되도록 매 순간 격자계를 변형하고 Godunov 법에 기초한 다상 압축성 유동의 유량을 적용하여 2차원 및 축대칭 수중폭발 현상을 해석하였다. Phi and Ahn (2011)은 상용코드인 FLUENT를 사용하여 비압축성과 압축성을 연성시킨 유체 충격 문제를 해석하고 선저 공기 운할 해석에도 적용하였다. Abrahamsen and Faltinsen (2011, 2012)은 갇힌 기체에 의한 압력 진동 주기에 주위 액체의 부가질량 효과가 큰 영향을 미치며 압력 진동이 빠르게 감쇠되는 이유로 갇힌 기체의 유출이나 미찰보다 열전달에 의한 진동 에너지 방출이 중요함을 보고하였다.

비압축성에 가까운 액체의 유동해석에 기존의 압축성 유동 해석에 주로 사용되어오던 밀도 기반 기법을 적용하는 경우 액체에 대한 상태방정식(equation of state)의 수치적 경직성이 많은 어려움을 초래한다. 이에 따라 최근에는 비압축성 및 압축성 유체가 혼재된 유동장 해석에 압력 기반 기법을 적용하려는 연구들이 많이 발표되어 오고 있다 (Hu, et al., 2009; Chen & Przekwas 2010; Ma, et al., 2014). Ma, et al. (2016)은 다상 압축성 유동에 대한 압력 기반 코드인 openFoam의 compressibleInterFoam을 이용하여 슬로싱 과정에서 갇힌 기체의 압축성 효과를 모사하였다. 갇힌 기체로 인해 수직 벽면에 작용하는 유체 충격력에 5~6 ms의 주기를 갖는 진동이 발생하고 0.2 s 동안 빠르게 감쇠됨을 보고하였다.

본 연구에서는 compressibleInterFoam을 이용하여 많은 실험 및 비압축성 유동해석 결과가 보고된 댐 붕괴 유동 과정에서 갇힌 공기의 압축성 효과에 의한 물의 압력 진동을 모사하였다. Hu and Kashiwagi (2004)의 댐 붕괴 유동 실험을 모사하고 계산된 압력의 시간 변화를 실험결과 및 다른 비압축성 유동 해석 결과들과 비교하였다. 유입 유동의 속도 및 유량 등이 갇힌 공기의 압력 진동에 미치는 영향을 검토하기 위해 실험 조건이 다른 Zhou, et al. (1999)의 실험에 대한 수치모사를 수행하고 계산결과와의 변화를 검토하였다.

2. 수치해석 기법

지배방정식은 온도 변화가 발생하는 다상 압축성 유체들에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존식이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho e_t}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_t \vec{U}) = -\nabla \cdot (p \vec{U}) + \dot{q} + \nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau_{ij}) + \rho \vec{g} \cdot \vec{U} \quad (3)$$

$$e_t \equiv \hat{e} + \frac{1}{2}(\vec{U} \cdot \vec{U}) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, \vec{U} 는 속도벡터, μ 는 점성계수, \vec{g} 는 중력가속도 벡터, \dot{q} 은 열전달률, τ_{ij} 는 점성응력, \hat{e} 는 내부에너지이며 점성응력에서 2차 점성계수(the second viscosity coefficient) 효과는 무시되었다 (Ma, et al., 2016; Luo, et al., 2016). 열전달률은 Fourier 법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{q} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (5)$$

여기서 κ 는 열전도계수이고 T 는 온도이다.

매 순간 상들의 경계를 포착하기 위하여 VOF(Volume of Fluid)법이 사용되었다. 압축성 해석에서도 주어진 혼합 유체에서 물의 질량이 차지하는 비율 α 의 전미분이 영이어야 하므로 다음과 같은 α 에 대한 수송방정식이 적용된다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (6)$$

실제 계산에서는 매질 경계면 주위에서 발생하는 수치적 확산을 감소시키기 위해 Malgarinos, et al. (2015)가 제안한 형태의 추가 항이 적용되었다.

밀도, 속도벡터 및 내부에너지에 대한 식에 압력과 온도가 사용되고 있으므로 종속변수들 사이에 두 가지의 부가적인 관계식이 요구된다. 물질의 열역학적 상태는 두 개의 독립 상태변수에 의해 결정되므로 밀도, 압력, 내부에너지 및 온도의 상태변수들 사이에 두 개의 관계식을 적용할 수 있다. 일반적으로 기체의 내부에너지는 온도와 압력의 함수지만 기체의 밀도가 낮은 경우 내부에너지의 압력 의존도는 무시할만하다. 본 연구에서 공기는 이상기체로 가정되며 공기의 정적비열은 온도만의 함수로 가정된다. 따라서 공기의 경우 내부에너지의 온도에 따른 변화율은 정적비열 C_v 로 주어지며 밀도, 압력 및 온도 사이의 관계는 이상기체 상태방정식을 가정한다.

$$d\hat{e} = C_v(T) dT \quad (7)$$

$$p = \rho_{air} R_{air} T \quad (8)$$

여기서 R_{air} 은 기체상수이며 287 J/kgK로 주어졌다. 내부에너지-온도의 관계식은 물에서도 동일한 형태로 적용되었으며 공기와 물의 정적비열 C_v 는 각각 0.717 kJ/kgK과 4.18 kJ/kgK로 주어

졌다. 공기와 물의 정적비열에도 약 5.8배 차이가 있으나 밀도차가 크기 때문에 공기에서 상당한 온도 변화를 발생시키는 열전달에도 물의 시공간상 온도 변화는 적용된 물의 정적비열과 관계없이 무시할만하다.

액체에 대해 질량보존식에서 추정된 밀도를 기저로 압력을 구하는 경우 밀도-압력 관계식의 수치적 경직성(stiffness)으로 인해 많은 어려움이 발생한다. 그러나 본 연구에서 사용되는 압력 기반 압축성 해석의 경우 질량보존이 만족되도록 수정되어가는 압력으로부터 밀도-압력 관계식을 이용하여 밀도가 추정된다. 액체의 압력, 밀도 및 온도 등에 대한 상태방정식으로는 Tait 방정식과 이를 기반으로 수정된 Murnaghan 및 Tammann 방정식 등이 사용되어왔다. 이러한 상태방정식들은 실제 액체의 상태변수 변화에 대한 정확한 관계식을 제공하기 때문에 수중폭발 등과 같이 액체의 압축성이 중요한 경우에 유용하다 (Shin, et al., 2006). 본 연구의 경우 물에서의 음속이 공기에서보다 훨씬 크다는 사실은 중요하지만 압력 변화와 무관하게 물의 밀도 및 온도 변화는 거의 무시할 수 있다. 이에 따라 물의 밀도-압력 관계식은 다음과 같은 순압유체(barotropic fluid) 관계식을 가정하고 물의 압축성 계수의 변화, 즉 음속 변화에 따른 계산결과의 변화를 검토하였다.

$$\rho_{water} = \rho_{0,water} + \psi(p - p_0) \quad (9)$$

여기서 $\psi = 1/R_{water}T$ 이다. 식 (9)에서 ψ 가 영에 가까워지면 밀도는 상수가 되어 비압축성 유체가 되며 압력 기반 기법의 경우 ψ 가 영이어도 추정된 압력에서 밀도를 구하는 과정에 아무런 어려움이 없다. 본 계산에서는 Ma, et al. (2016)에서 사용된 바와 같이 $R_{water} = 3000 \text{ J/kgK}$ 로 주어졌다. 이 수치는 물의 음속으로부터 추정된 체적탄성계수인 $E_v = 2.15 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 로 계산된 압력 변화에 따른 부피 변화율과 유사한 압력-밀도 관계를 준다. 계산결과가 비교된 Hu and Kashiwagi (2004)의 실험 예에서 발생한 진폭 2000 Pa의 압력 변화는 온도 300 K에서 공기의 경우 약 0.023 kg/m^3 의 밀도 변화를 초래하며 물의 경우 약 0.0022 kg/m^3 의 밀도 변화를 유발한다. 이러한 변화는 기준 밀도들에 비해 공기의 경우 약 1.92%, 물의 경우 약 0.00022%의 밀도 변화에 해당한다. 다음 절에서 R_{water} 를 기준치에 비해 100 배 증가 혹은 감소시켜 실제 물보다 비압축성에 가까운 경우와 압축성을 과장한 경우에 대한 계산결과들을 검토하였다.

3. 다상 압축성 유동 해석 코드를 이용한 댐 붕괴 유동 모사

갇힌 공기에 의한 물의 압력 진동에 대해 언급된 Hu and Kashiwagi (2004)의 댐 붕괴 유동 실험에 대해 다상 압축성 유동 해석 프로그램을 이용한 수치모사를 수행하였다. 압력 예측점에서 기록된 압력의 시간변화는 8회의 반복 실험을 통해 예측된

결과들이 모두 비교되었으며 대부분의 시각에서 예측된 결과들의 반복성이 우수한 것으로 확인되었다. 그러나 특정 시각에서는 8회의 예측 결과들 사이에 큰 분산이 나타났으며 이 시점은 물이 벽에 부딪힌 후 튕겨나와 다시 자유표면과 부딪히면서 공기가 갇히는 순간이라고 보고되었다. Fig. 1에서 보인바와 같이 계산영역은 $0 \text{ m} < x < 1.18 \text{ m}$, $0 \text{ m} < y < 0.59 \text{ m}$ 이다. 초기에 댐은 $x = 0.68 \text{ m}$ 에 위치하며 댐의 왼쪽에 가두어진 물의 높이는 0.12 m 이다. $t = 0 \text{ s}$ 에서 댐이 제거되어 물은 오른쪽 벽면을 향해 흐른다. 오른쪽 벽면 바닥으로부터 0.01 m 지점에서 시간에 따른 압력변화가 기록되었다.

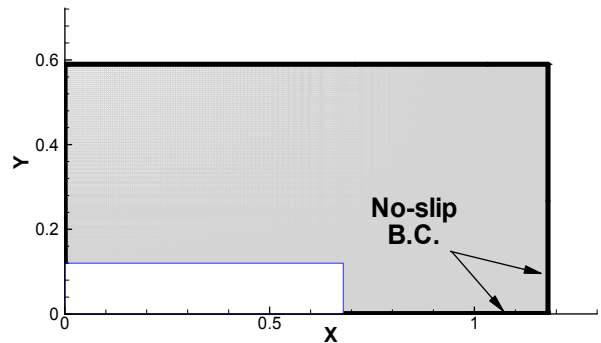


Fig. 1 Computational domain, mesh, and initial condition of the dam break problem

1200×600, 900×450 및 600×300의 세 가지 크기의 격자계들을 사용한 계산결과들이 비교되었다. 각각의 격자계들은 $x = 1.18 \text{ m}$, $y = 0 \text{ m}$ 에서의 Δx , Δy 에 비해 $x = 0 \text{ m}$, $y = 0.59 \text{ m}$ 에서의 Δx , Δy 가 10 배가 되도록 일정한 신장률을 유지하였다. 조밀한 격자계의 오른쪽 구석에서 최소 격자간격은 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 이다. 모든 벽면에서는 점착조건이 적용되었다.

초기 유체는 정지해 있으며 기준 압력과 온도는 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, 300 K 로 주어졌다. 공기의 기체 상수 R_{air} 는 287 J/kgK 로 고정되었으며 전절에서 설명한 바와 같이 물의 R_{water} 는 3000 J/kgK 를 기준으로 100, 10, 1/10 및 1/100 배로 변화시켜 계산결과들을 비교하였다. 물의 기준 밀도 $\rho_{0,water}$ 는 1000 kg/m^3 으로 주어졌다.

Fig. 2는 전반적인 압력장의 시간변화를 보여준다. 공기 영역의 압력 변화도 계산되지만 공기의 밀도가 작아서 물에서 발생하는 압력 변화에 비해 무시할만한 압력 변화만 발생한다. 물의 경우 매 순간 공간상의 압력분포는 압축성 해석임에도 불구하고 국부적 굴곡 없이 부드럽게 변함을 확인할 수 있다. $t = 0.8 \text{ s}$ 에서는 자유표면에 부딪혀 튕겨 나온 물에 의해 두 번째로 갇힌 공기 내부의 압력이 낮아져 있음을 관찰할 수 있다. Fig. 3에서는 $t = 0.7 \text{ s}$ 에서 계산된 자유표면 형상을 Hu and Kashiwagi (2004)가 보고한 결과들과 비교하였다.

Fig. 4에서는 압력 예측점인 $x = 1.18 \text{ m}$, $y = 0.01 \text{ m}$ 에서 계산된 압력의 시간변화를 실험 및 다른 계산결과들과 비교하였다. 본 계산의 경우 공기가 갇히는 시점인 $t = 0.75 \text{ s}$ 이전까지는 실험과 유사한 결과를 보이지만 그 이후에는 큰 압력 진동이 나타난 후 빠른 감쇠를 보이며 자유표면에서 튕겨 나온 물에 의해

공기가 다시 갇히면 새로운 압력 진동이 나타남을 관찰할 수 있다. 실험에서도 $t = 0.75$ s 주위에서 벽면 압력 측정점에서의 계기압력이 420 Pa에서 1880 Pa 사이의 분산을 보이며 0.85 s 및 1 s 주위에서도 압력 분산이 계속되었다.

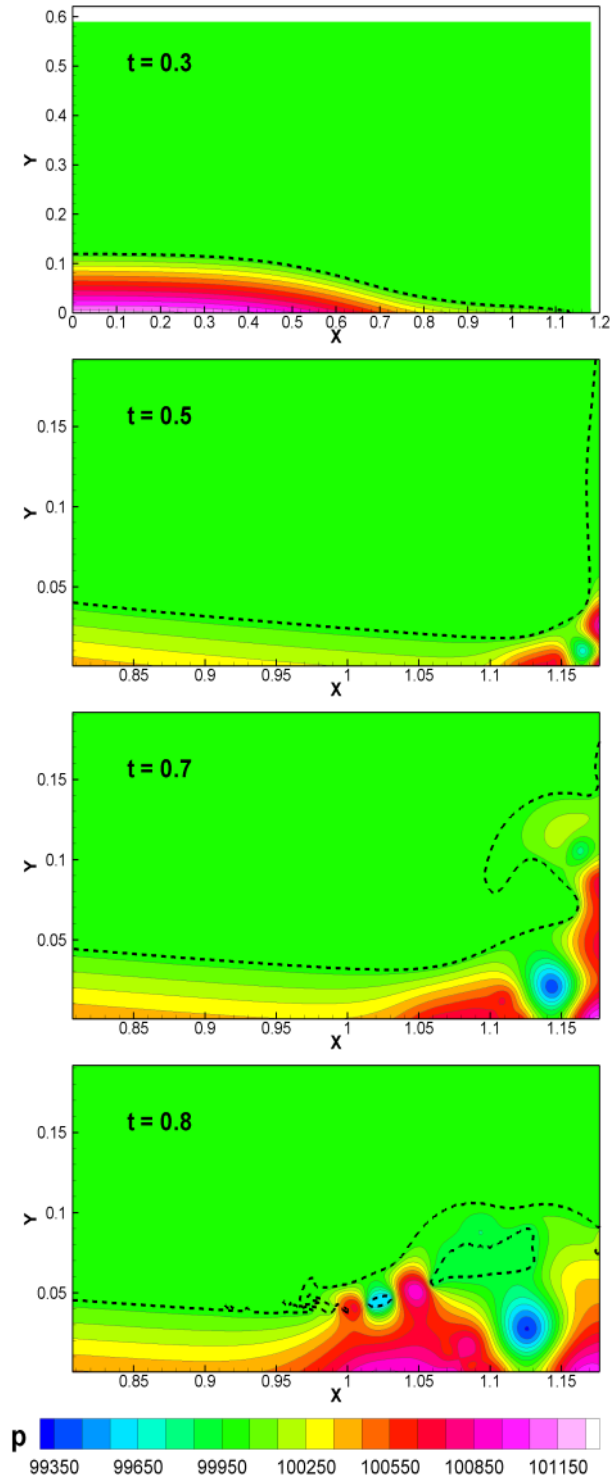


Fig. 2 Snapshots of pressure fields in the broken dam flow; the dashed line represents the instantaneous free surface, where the water mass fraction is 0.5

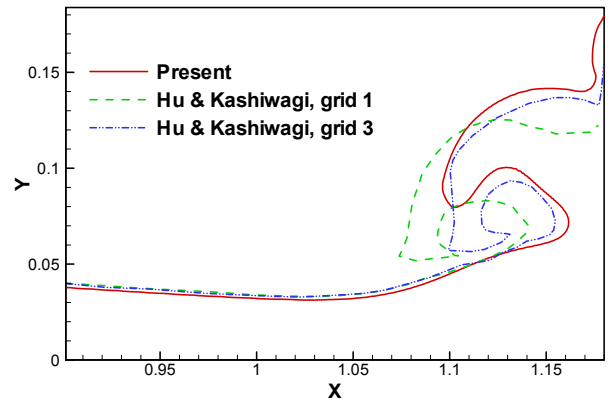


Fig. 3 Comparison of computed free surface profiles, at $t = 0.7$ s

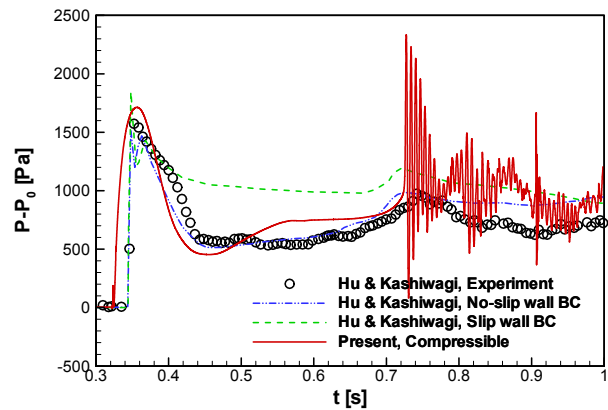


Fig. 4 Comparison of computed and measured time variations of the pressure, at $x = 1.18$ m and $y = 0.01$ m

Fig. 5는 세 가지 격자계에서 계산된 압력의 시간변화 비교를 보여준다. 공기가 갇히기 전까지는 유사한 압력 변화가 계산되었으나 예측된 압력 진동의 진폭에는 차이가 있다. 공기도 갇히기 전까지는 비압축성에 가까운 속도장이 유지되다가 갇히는 순간의 자유표면 형상 및 속도 분포에 따라 미세하게 압축된다. 갇히는 순간 자유표면 형상 및 속도의 작은 차이도 공기 압축의 강도 측면에서는 큰 영향을 미치기 때문에 압력 진동 진폭의 정확한 추정 어렵다. 그러나 세 가지 격자계에 의한 결과들 모두 압력 진동 발생 시기나 진동 주기 및 빠른 진동 감쇠 특성들은 유사하게 예측한다.

Fig. 6은 물의 압축성 계수인 R_{water} 의 변화에 따라 계산된 압력의 시간변화 비교를 보여준다. Ma, et al. (2016)가 제시한 R_{water} 의 기준치가 이미 충분히 비압축성에 가깝기 때문에 R_{water} 를 10 배 및 100 배 증가시켜 실제 물보다 더 비압축성에 가까운 유체로 가정한 경우에는 계산 결과에 전혀 변화가 나타나지 않았다. R_{water} 의 크기를 1/10 또는 1/100 배 줄임으로써 물의 압축성을 과장한 경우에도 공기가 갇히기 전까지는 계산결과에 영향이 없으나 공기의 압축 팽창이 시작된 이후에는 기준치보다 1/100 배 감소시킨 경우 압력 진동의 진폭이 약간 증가하는 결과가 나

타났다. 이러한 현상은 공기가 갇힌 후의 압력 변화를 자세히 보여주는 Fig. 7에서 확인된다.

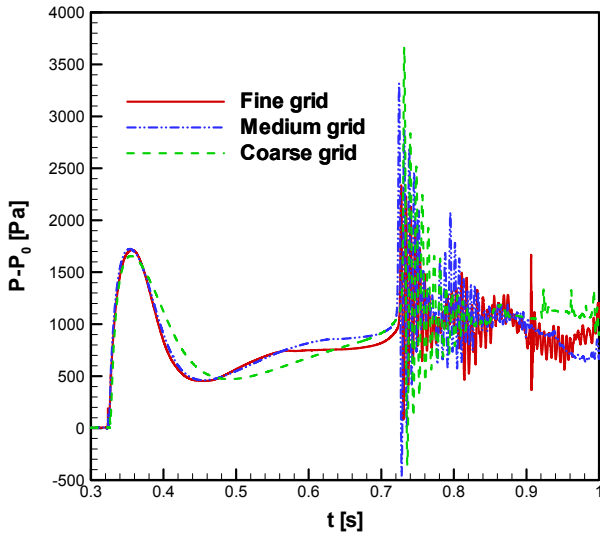


Fig. 5 Grid independency test for the computed time variations of pressure, at $x = 1.18$ m and $y = 0.01$ m

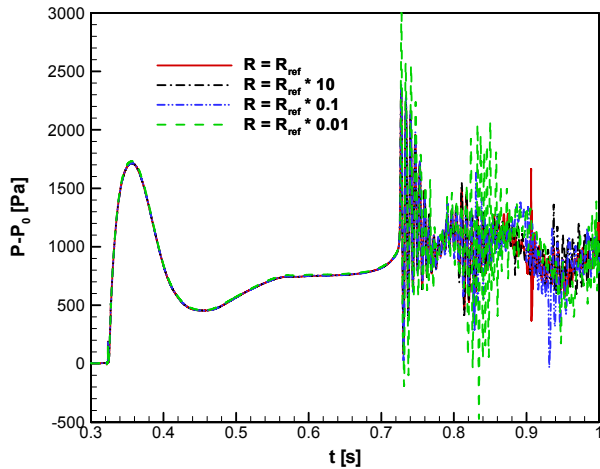


Fig. 6 Effects of the compressibility parameter of water on the computed time variations of pressure, at $x = 1.18$ and $y = 0.01$ m

계산의 안정성 보장을 위해 전체 유동장에서 국소 요소 Courant 수의 최대치가 0.5 이하가 되도록 물리적 시간단계마다 시간간격이 조절되었다. 압력 진동 주기와 계산의 시간간격에 대한 비교를 보여주기 위해 Fig. 7의 아래 그림에서는 시간에 따라 계산된 압력을 매번 5번째 시간단계마다 기호로 나타내었다. 그림으로부터 한 번의 압력 진동 주기 안에 충분히 많은 수의 계산 시간단계들이 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 비정상 유동 해석에서의 시간간격은 시간미분 항의 정확도 및 계산의 안정성이 모두 확보될 수 있을 만큼 작아야한다. 본 계산의 경우 시간미분 항의 정확성을 위해 요구되는 시간간격보다 계산의 안정성 확보를 위한 시간간격이 훨씬 작다.

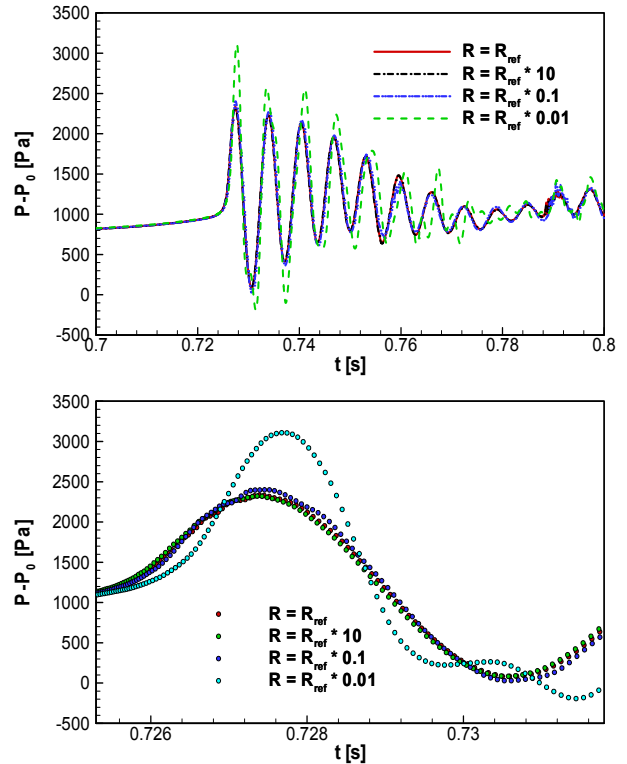


Fig. 7 Effects of the compressibility parameter of water on the computed time variations of pressure after air is entrapped

Fig. 8은 갇힌 공기가 압축 팽창하는 한 주기 동안 갇힌 공기 주위 압력장 변화를 보여준다. 그림에서 t_0 는 압력 계측점 압력이 국부 최대값을 갖는 순간인 $t = 0.727$ s이며 Δt 는 두 국부 최대값 사이의 시간차인 7 ms로서 네 그림은 압력 진동의 약 1/4 주기마다의 압력장에 해당한다. 그림에 보인 압력 범위는 Fig. 2의 압력 범위보다 훨씬 넓으며 갇힌 공기의 압축 팽창에 따른 공기 압력의 시간 변화는 대단히 크게 발생함을 관찰할 수 있다. 그러나 공기의 밀도가 물에 비해 매우 낮아서 매 순간 공기 내부 압력의 공간상 변화는 항상 무시할 수 있음을 확인할 수 있다. 갇힌 공기 주위 물 영역 압력의 공간에 따른 변화는 공기 내부의 압력으로부터 주위로 연속적으로 부드럽게 변화하며 시공간상의 변화가 없는 외부 공기와의 경계면 압력과 외류에 의한 국부적 낮은 압력 등의 특성이 계속 유지됨을 관찰할 수 있다. 이러한 사실은 물의 음속이 대단히 커서 매질 경계면에서 발생하는 시간에 따른 급격한 압력 변화가 주위 물 영역의 압력장에 순간적으로 반영됨을 의미한다. 이상의 논의는 매질 경계면에서 물의 압력이 매 순간 일정하다는 가정은 공기의 작은 밀도와 매질 경계면에서 압력의 연속에 의해 여전히 유효하지만 시간에 따라 발생하는 공기 내부 압력의 급격한 변화는 주위 물 압력장에 순간적으로 반영되어 물의 압력도 시간에 따라 급변함을 설명한다.

Fig. 9는 압력 진동의 1/4 주기마다 자유표면의 시간 변화를 보여주며 Fig. 10은 3/4 주기 경과하는 동안의 속도벡터 변화를 보여준다. Fig. 8의 등압력선 분포에서 보듯이 외부 공기 영역에

서의 압력 변화는 무시할 만큼 작지만 공기의 밀도가 대단히 낮아 짧은 시간 동안임에도 불구하고 튕겨 나온 물이 다시 자유표면과 부딪히는 영역 주위 공기의 속도벡터에는 상당한 시간변화가 발생함을 관찰할 수 있다. 그러나 물의 밀도가 크고 시간이 짧기 때문에 물 압력장의 급격한 변화에도 불구하고 물의 속도벡터 변화는 미미함을 관찰할 수 있다.

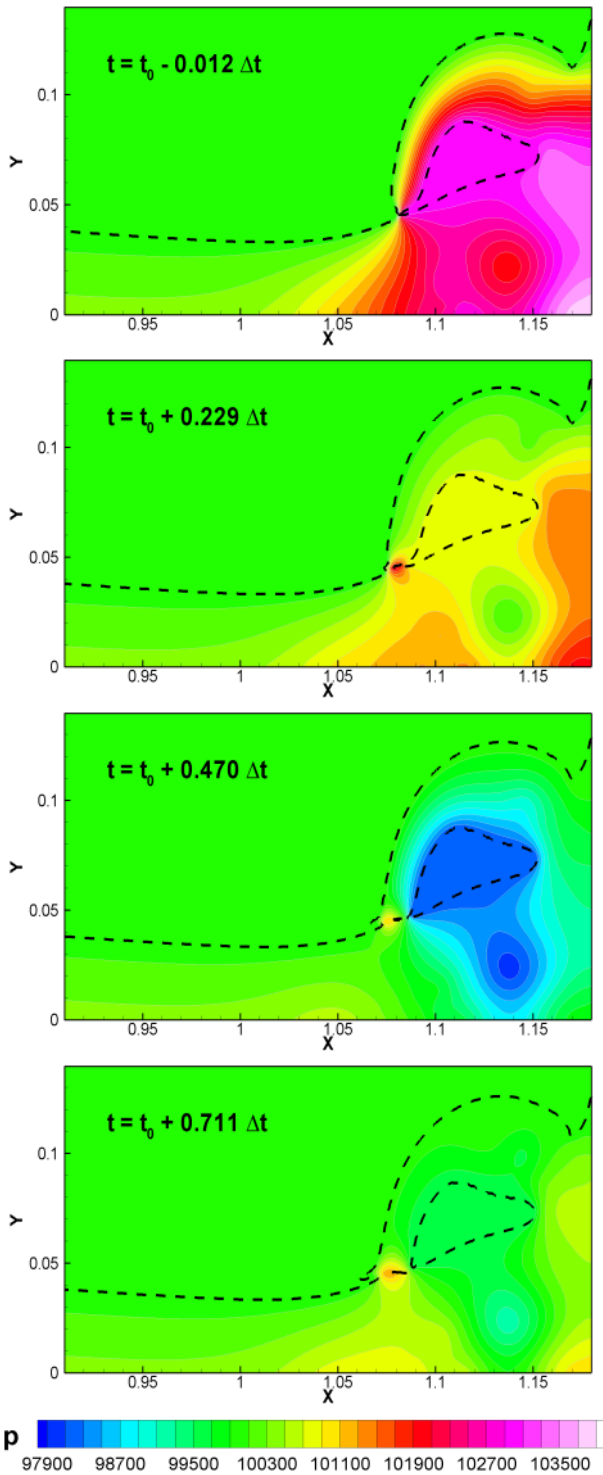


Fig. 8 Snapshots of pressure fields around the pulsating entrapped air

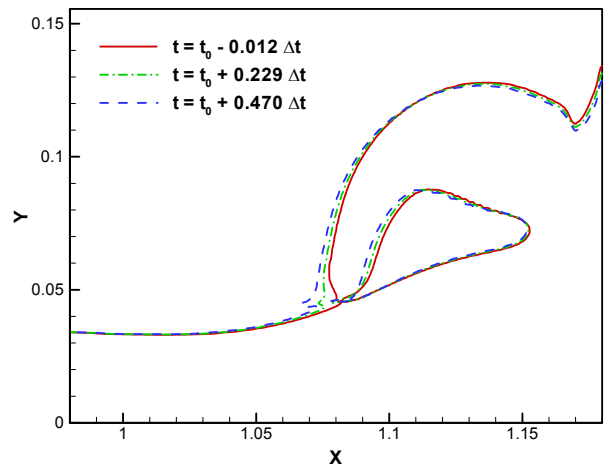


Fig. 9 Time variations of free surface during the pulsation of the entrapped air

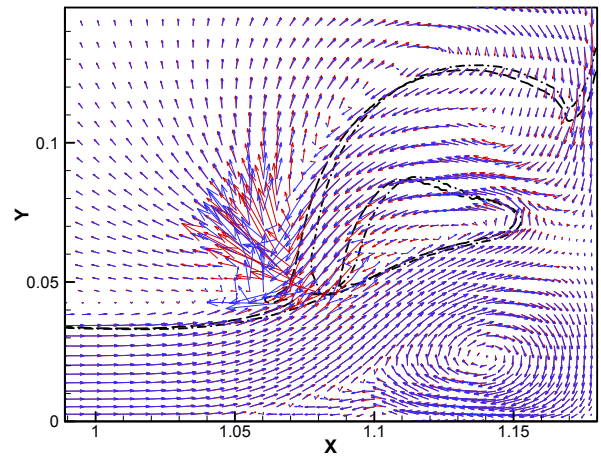


Fig. 10 Changes of velocity vectors around the entrapped air during the pulsation

Fig. 11은 갇힌 공기가 압축 팽창하는 동안 밀도와 온도 분포의 시간변화를 보여준다. 전절에서 언급된 바와 같이 압력 기반 압축성 해석을 적용하고 있기 때문에 계산된 압력 변화로부터 물의 밀도가 추정되며 이 문제에서 물 밀도의 시공간상 최대 변화량은 0.00022% 이하이다. 이러한 변화량은 압력장 수정 과정의 수렴 결정 기준 등을 고려하면 수치적 오차와 비교해 무의미하다. 온도의 경우에도 물의 영역에서는 전 시공간상의 변화가 극히 미미하여 초기 기준 온도가 거의 유지되었다. 그러나 공기 영역에서는 밀도와 온도에 상당한 시간변화가 발생한다. 그림으로부터 갇힌 공기 경계 주위를 제외하면 공기의 밀도와 온도가 시간에 따라서는 변하지만 공간상의 변화는 미미함을 관찰할 수 있다. 즉 일정한 온도로 유지되는 물 내부에서 공기의 온도가 시간에 따라 변하므로 공기나 물로부터 반대쪽 매질로 열전달이 발생한다. 그러나 검사표면을 통한 일정량의 열전달에 의해 발생하는 온도 변화량은 검사체적 내의 질량과 비열의 곱에 반비례하므로 공기에서만 상당한 온도 변화가 발생할 뿐 물에서의 온도 변화는 무시할만하다.

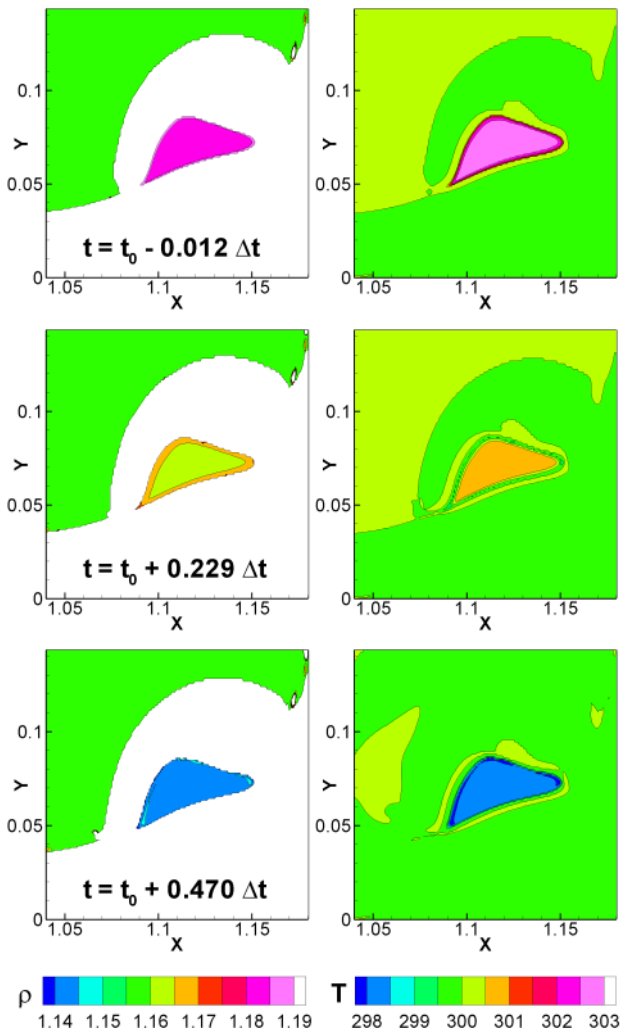


Fig. 11 Snapshots of density and temperature fields around the pulsating entrapped air

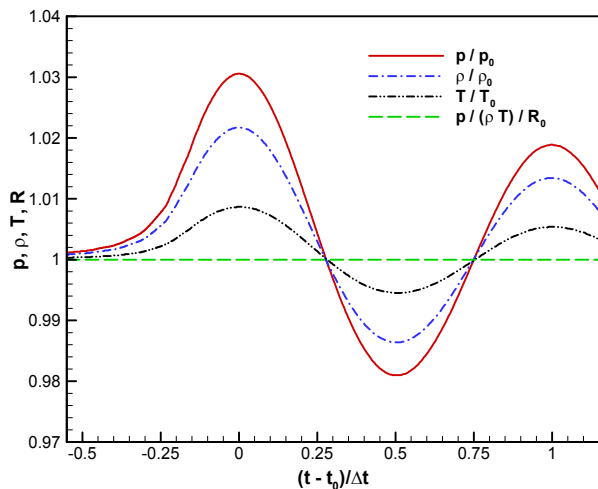


Fig. 12 Time variations of pressure, density, and temperature of the entrapped air

Fig. 12는 일정 시간 동안 갇힌 공기 내부로 유지되는 점인 $x = 1.09 \text{ m}$, $y = 0.084 \text{ m}$ 에서 시간에 따라 기록된 압력, 밀도, 온

도의 시간 변화를 보여준다. 각 물리량의 변화폭을 상대 비교하기 위해 각 종속변수들은 초기치들로 무차원화되었다. 그림으로부터 압력, 밀도, 온도의 변화 비율은 다르지만 시간에 대해서는 정확히 동일 위상의 진동이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 최대 압축이 발생하는 시점에서 압력은 3.06%, 밀도는 2.17%, 온도는 0.87% 상승하였으며 최대 팽창이 발생한 시점의 경우 압력은 1.90%, 밀도는 1.36%, 온도는 0.55% 하강하였다. 공기에 대해서는 이상기체 상태방정식을 가정하고 있으므로 압력을 밀도와 온도로 나눈 값은 항상 일정해야하며 그림에서 그 비를 나타낸 점선이 정확히 기준치로 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

4. 댐 붕괴 유동 크기에 따른 압력 진동 특성 변화

댐 붕괴 유동에서 반대편 벽으로 유입되는 유속 및 수위 등의 변화에 따른 벽면 압력 진동 특성 변화를 검토하기 위해 유동장 크기 및 초기 조건이 다른 실험에 대한 수치모사를 수행하였다. 이 경우에 대한 실험결과는 Zhou, et al. (1999)에 의해 보고되었으며 여러 연구자들 (Mokrani & Abadie, 2016; Nielsen, 2003)에 의한 비압축성 해석 결과들이 보고되어 있다. 초기에 댐 내부에는 길이 1.2 m, 높이 0.6 m의 물이 가득 차 있으며 댐으로부터 오른쪽 벽면까지의 거리는 2.02 m이고 오른쪽 벽면에 바닥으로부터 0.16 m 높이에서 압력의 시간변화가 계속되었다. 물과 공기의 물성치나 계산조건들은 전절과 동일하게 유지되었다.

Fig. 13에서 오른쪽 벽면의 압력 계측점에서 기록된 압력의 시간변화를 Zhou, et al. (1999)의 실험결과와 Mokrani and Abadie (2016) 및 Nielsen (2003)의 계산결과들과 비교하였다. 전절의 경우와 유사하게 벽면에서 튀겨 나온 물에 의해 공기가 갇히는 시점인 $t = 1.48 \text{ s}$ 이후 본 계산에서는 물의 급격한 압력 진동이 예측되었으며 실험에서도 비슷한 순간에 압력의 분산이 보고되었다. 유동장이 커지면서 압력 진동 주기가 전절의 7 ms에 비해 약 7배 증가한 48 ms로 나타났다. 이는 두 계산에서 예측된 갇힌 공기 부피의 비보다 훨씬 큰 차이로서 Abrahamsen and Faltnsen (2012)이 지적한 바와 같이 갇힌 공기의 압력 진동 주기에 주위 물의 부가질량이 큰 영향을 미친다는 설명을 뒷받침한다.

공기가 처음 갇히는 시점인 $t = 1.48 \text{ s}$ 에서 시작된 압력 진동은 빠른 감쇠를 보이지만 $t = 1.78 \text{ s}$ 이후 다시 진폭이 커짐을 관찰할 수 있다. Fig. 14는 일정 시간 동안 갇힌 공기 내부로 유지되는 점인 $x = 2.91 \text{ m}$, $y = 0.385 \text{ m}$ 에서 계산된 압력의 시간변화와 벽면 계측점에서 물 압력의 시간변화 비교를 보여준다. 그림으로부터 $t = 1.78 \text{ s}$ 이전까지는 벽면 물 압력의 국부 최대치가 나타나는 시점이 갇힌 공기 내부 압력의 국부 최대치가 발생하는 시점과 일치한다. 그러나 그 이후 갇힌 공기 내부의 압력 진동은 계속 감쇠되어 나가지만 벽면 압력은 다른 진폭, 주기, 위상의 진동이 새로 시작되고 있음을 관찰할 수 있다. $t = 1.5 \text{ s}$ 와 1.8 s 에서의 압력장들을 보여주는 Fig. 15에서 확인되었듯이 $t = 1.5 \text{ s}$ 에 발생했던 처음 갇힌 공기는 $t = 1.8 \text{ s}$ 에서도 부피를 거의 유지하지만 내부 압력은 주위 압력으로 회복되었다. 그러나

자유표면에서 튀겨 나온 물에 의해 두 번째로 갇힌 공기 내부의 압력 진동이 발생하여 낮은 압력이 형성되고 벽면 물 압력 역시 낮다. 새로 갇힌 공기의 부피는 처음 갇힌 공기의 부피보다 훨씬 작으나 압력 진동의 주기는 큰 차이가 없으며 이는 이미 언급한 바와 같이 주위 물의 부가질량 효과로 사료된다.

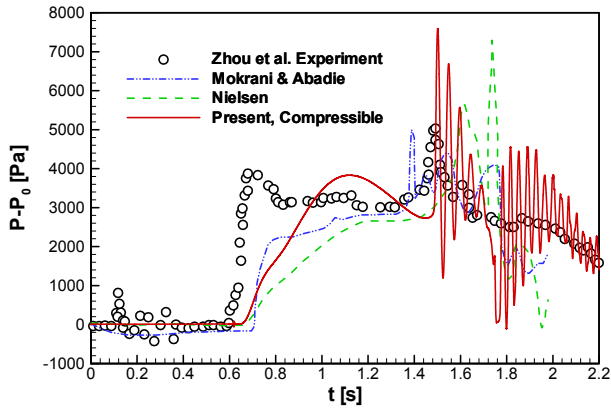


Fig. 13 Comparison of computed and measured time variations of the pressure, at $x = 3.22$ m and $y = 0.16$ m

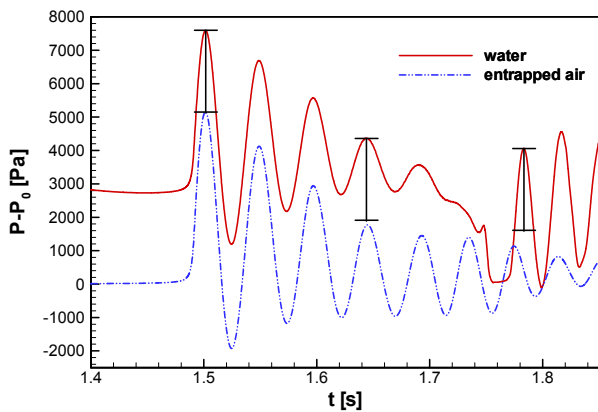


Fig. 14 Comparison of time variations of the pressure, at $x = 3.22$ m, $y = 0.16$ m and $x = 2.91$ m, $y = 0.385$ m

여러 가지 유사한 유체 충격 실험에서 계속된 갇힌 공기에 의한 압력 진동들이 일관되게 빠른 감쇠를 보이는 이유에 대해 Abrahamsen and Faltinsen (2011)은 갇힌 공기의 외부 유출이나 마찰에 의한 에너지 손실보다 공기 내부 온도 변화에 따른 열에너지 방출이 중요하다고 예측하였다. 그러나 실험에서 유동에 의해 갇힌 공기 내부에서 아주 짧은 시간 동안 발생하는 온도 변화를 정확히 계측하기가 어려우며 다상 압축성 유동 해석을 통해 갇힌 공기 효과를 해석한 Ma, et al. (2016)에서도 특정 순간 벽면 온도의 공간 상 변화는 보고하였으나 갇힌 공기 내부 온도의 시간변화는 보고되지 않았다. Fig. 16은 일정한 시간 동안 갇힌 공기 내부로 유지되는 점인 $x = 2.91$ m, $y = 0.385$ m에서 계산된 온도의 시간 변화를 보여준다. 물의 온도가 기록되는 압력 계측점에서의 온도 변화도 같이 나타내었으며 물의 온도는 300 K에서 전혀 변화가 없

음을 확인할 수 있다. 공기 내부 온도의 경우 갇힌 직후 304.3 K 까지 상승한 후 감쇠 진동한다. 그러나 그림에서 보인 바와 같이 온도가 주위 물보다 높게 유지되는 시간이 28.7 ms로 낮은 온도가 유지되는 시간 19.7 ms보다 훨씬 길다. 또한 온도 변화의 진폭이 감쇠되어 나감에도 불구하고 두 번째 온도 상승 폭이 2.98 K로 첫 번째 온도 하강 폭 2.14 K보다 오히려 크다. 이러한 온도 진동 특성은 공기가 압축 팽창하는 과정에서 주위 물로 열을 발산함을 의미하며 압력 진동의 빠른 감쇠에 공기 내부 온도 변화에 따른 열전달에 의한 에너지 방출이 중요함을 뜻한다.

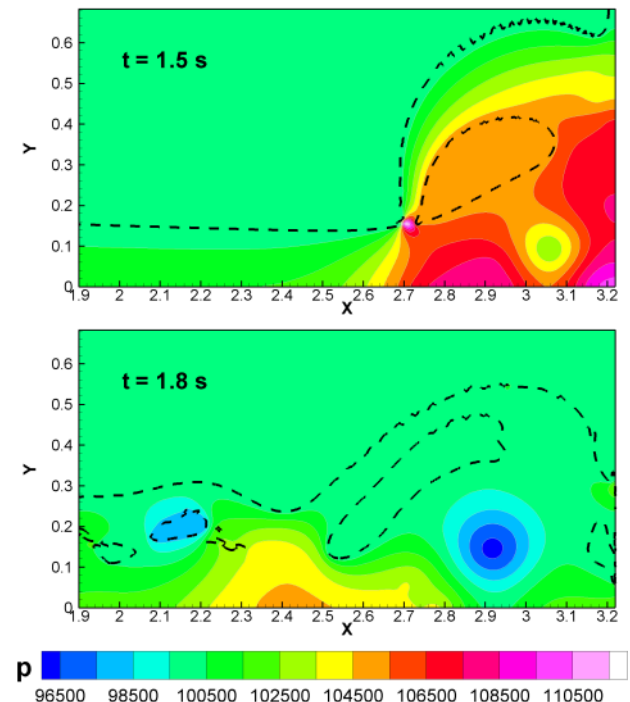


Fig. 15 Snapshots of pressure fields, at $t = 1.5$ s and $t = 1.8$ s

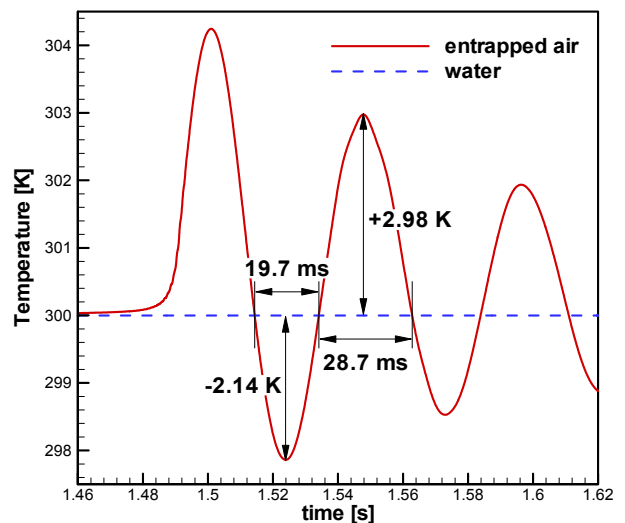


Fig. 16 Time variations of temperature in the entrapped air and water, at $x = 2.91$ m and $y = 0.385$ m

5. 결 언

댐 붕괴 유동에서 갇힌 공기의 압축 팽창에 의한 물의 압력 진동을 다상 압축성 유동 해석 코드를 이용하여 모사하였다. 다상 압축성 유동 해석임에도 압력 기반 기법을 적용함으로써 실제 물보다 비압축성에 가까운 밀도-압력 관계를 가정하여도 수치적 경직성에 따른 어려움이 전혀 발생하지 않았으며 시간에 따른 급격한 압력장 변화를 안정적이고 정확하게 포착할 수 있음을 확인하였다.

공기의 작은 밀도로 인해 공기 내부 압력의 공간상의 변화는 항상 미미하나 갇힌 공기의 압축 팽창에 따른 공기 압력의 시간 변화는 물과 벽면 충돌에 따른 물의 압력 변화량과 유사한 크기로 발생할 수 있음을 관찰하였다. 이러한 공기 압력의 급격한 진동은 물의 빠른 음속으로 인해 주위 물 유동장의 압력 분포를 순간적으로 변화시킴을 확인하였다.

벽으로 유입되는 유동 변화에 따라 압력 진동 주기는 크게 변하며 갇힌 공기의 진동 주기에 미치는 영향은 갇힌 공기의 자체 질량보다 주위 물 유동장의 부가질량 효과가 중요함을 확인하였다.

갇힌 공기 내부 온도의 시간변화는 일반적인 감쇠 진동과 달리 주위 온도보다 높은 온도가 유지되는 시간이 길고 온도 상승 폭도 크기 때문에 주위로 많은 열을 방출하고 적은 열을 흡수하여 진동 에너지 방출에 중요한 원인이 됨을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

References

Abrahamsen, B.C. & Faltinsen, O.M., 2011. The effect of air leakage and heat exchange on the decay of entrapped air pocket slamming oscillations. *Physics of Fluids*, 23(10), pp.102107.

Abrahamsen, B.C. & Faltinsen, O.M., 2012. The natural frequency of the pressure oscillations inside a water-wave entrapped air pocket on a rigid wall. *Journal of Fluids and Structures*, 35, pp.200-212.

Chen, Z.J. & Przekwas, A.J., 2010. A coupled pressure-based computational method for incompressible/compressible flows. *Journal of Computational Physics*, 229, pp.9150-9165.

Hu, C. & Kashiwagi, M., 2004. A CIP-based method for numerical simulations of violent free-surface

flows. *Journal of Marine Science and Technology*, 9, pp.143-157.

Hu, X.Y. Adams, N.A. & Iaccarino, G., 2009. On the HLLC Riemann solver for interface interaction in compressible multi-fluid flow. *Journal of Computational Physics*, 228, pp.6572-6589.

Luo, M. Koh, C.G. Bai, W. & Gao, M., 2016. A particle method for two-phase flows with compressible air pocket. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 108, pp.695-721.

Ma, Z.H. Causon, D.M. Qian, L. Mingham, C.G. & Ferrer, P.M., 2016. Numerical investigation of air enclosed wave impacts in a depressurised tank. *Ocean Engineering*, 123, pp.15-27.

Ma, Z.H. Causon, D.M. Qian, L. Mingham, G. Gu, H.B. & Ferrer, P.M., 2014. A compressible multiphase flow model for violent aerated wave impact problems. *Proceedings of The Royal Society A*, 470, 20140542.

Malgarinos, I. Nikolopoulos, N. & Gavaises, M., 2015. Coupling a local adaptive grid refinement technique with an interface sharpening scheme for the simulation of two-phase flow and free-surface flows using VOF methodology. *Journal of Computational Physics*, 300, pp.732-753.

Mokrani, C. & Abadie, S., 2016. Conditions for peak pressure stability in VOF simulations of dam break flow impact. *Journal of Fluids and Structures*, 62, pp.86-103.

Nielsen, K., 2003. *Numerical prediction of green water loads on ships*. Technical University of Denmark: Lyngby, Denmark.

Park, C.W. & Lee, S., 2008. The effect of water compressibility on a rigid body movement in a water-filled duct driven by compressed air. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(4), pp.345-352.

Park, J.S. Kim, H.Y. Lee, K.H. Kwon, S.H. Jeon, S.S. & Jung, B.H., 2009. An experimental study on compressibility effect in sloshing phenomenon. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(4), pp.12-18.

Phi, T.H. & Ahn, H.T., 2011. Air compressibility effect in CFD-based water impact analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.581-591.

Shin, S. Kim, I.C. & Kim, Y.J., 2005. Compressible two-phase flow computations using one-dimensional

ALE Godunov method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(4), pp.330–340.

Shin, S. Kim, I.C. & Kim, Y.J., 2006. Numerical analysis on spherically symmetric underwater explosion using the ALE Godunov scheme for two-phase flow. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 11(1), pp.29–35.

Zhou, Z.Q. Kat, J.O. & Buchner, B., 1999. A nonlinear 3D approach to simulate green water dynamics on deck. *7th International Conference on*

Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, France, 19–22 July 1999.



신 상 목