

압축공기로 움직이는 관 내부 수중 이동물체의 거동에 미치는 물의 압축성 영향

박찬욱*, 이승수†**

대불대학교 기계공학부*
충북대학교 토목공학부**

The Effect of Water Compressibility on a Rigid Body Movement in a Water-filled Duct Driven by Compressed Air

Chan Wook Park* and Sungsu Lee†**

Dept. of Mechanical Engineering, Daebul University
School of Civil Engineering, Chungbuk National University

Abstract

The motion of a projectile initiated by the release of highly pressurized air is simulated presuming the flow field as a two dimensional one. The effects of water compressibility on projectile movements are investigated, comparing results based on the Fluent VOF model where water is treated as an incompressible medium with those from the presently developed VOF scheme. The present model considers compressibility of both air and water. The Fluent results show that the body moves farther and at higher speeds than the present ones. As time proceeds, the relative difference of speed and displacement between the two results drops substantially, after acoustic waves in water traverse and return the full length of the tube several times. To estimate instantaneous accelerations, however, requires implementation of the water compressibility effect as discrepancies between them do not decrease even after several pressure wave cycles.

※Keywords: Two-phase(이상), Compressibility(압축성), Volume fraction(체적분율), Compressed air(압축 공기)

1. 서 론

공기탱크 내 저장되어 있는 고압의 압축공기를 순간적으로 밸브를 개방하여 관 내 저압의 물에 분사시켜 이로부터 강체를 관 외부로 이탈시키는

경우, 이동물체의 초기 거동을 정량적으로 예측할 필요성이 부각된다. 공기와 물에 의한 자유수면과 관련하여 선박 유체의 경우 슬로싱과 같은 내부 유동 (Cho et al. 2006), 조파 현상과 같은 외부 유동 (Kim et al. 2007) 등과 같은 분야에서 VOF (Volume of Fraction) 기법이 적용된 사례가 있으며, 자유수면 포착의 정밀도 향상 분야의 연구 (Park et al. 2005)도 진행된 바 있다. 그러나 다상 유동에 압축성이 고려된 경우에 대한 국내의 연구는 매우 미비하며, 이를 위해서는 공기와 물이 혼재하는 기체-액체 이상유동에 각 유체의 압축성 및 점성, 열전도성을 고려할 수 있고 또한 유체력에 따른 강체 거동과의 상호작용을 포함하는 유동 해석방법이 요구된다. 상용 CFD 코드인 Fluent에 이러한 기능 대부분이 포함되어 있는데 이상유동 해석모델의 일종인 VOF (Volume of Fluid) 모델과 이동격자를 생성하는 DM (Dynamic Mesh) 기능을 적용하면 이 문제에의 접근이 가능하다. 그러나 Fluent의 경우 VOF 모델에서 하나의 상 (Phase)만 비압축성으로 취급해야 한다는 제한이 따른다.

이에 본 연구의 저자는 공기와 물의 압축성 모두를 반영할 수 있는 유동해석을 위하여 액체에도 상태 방정식에 의한 압력과 밀도의 변화를 고려할 수 있는 수치해법을 개발하여 1차원 및 2차원 이차원 문제에 대한 해석이 수행된 바 있으며, 특히 1차원 문제는 해석해와의 비교를 통하여 검증이 수행하였다 (Park and Lee 2008).

밀폐된 영역 내에서 가상의 격막 (diaphragm)으로 분리되어있던 고압의 압축공기와 저압의 물이 순간적으로 격막이 제거되는 경우 발생하는 압축공기의 팽창현상은 액체가 가득 차있는 밀폐된 용기 내에 고압기체가 주입되어 작동하는 많은 유체 기계의 근본적인 유동현상에서 나타난다. 또한 수중 폭발에 의한 물체의 움직임이나 주위 유동 현상 등의 초기 메커니즘 규명에 매우 중요한 역할을 할 수 있다.

이러한 분자 차원의 섞임이 없는 (immiscible) 다유체 압축성 유동의 수치 해석에 있어서 가장 어려운 문제는 다유체의 상경계에서 나타나는 압력의 비정상적 교란 현상이었다. Laroutrou

(1991)는 비열비 γ 가 서로 다른 두 기체의 1차원 압축성 유동을 보존 형태의 Euler 방정식과 질량분율식 및 질량분율의 대수식으로 나타낸 γ 를 취하는 폴리트로픽 상태방정식으로 모델링하여 해석하였다. 이 과정에서 보존형태 질량분율식의 이산화에 필요한 셀 경계에서의 플렉스를 Euler 질량 보존식의 질량 플렉스와 질량분율과의 곱의 형태로 유도하여 질량분율이 음이 되는 문제점을 해결하였으나, 두 기체의 경계에서 발생하는 압력 교란은 해결하지 못하였다. 한편 Karni (1994)는 보존형태 Euler 방정식과 보존형태 비열비 수동수송식을 밀도, 입자속도, 압력 및 비열비 γ 를 미지량으로 취하는 비 보존형태로 전환시켜 이산화 하였다. 두 기체로 이루어진 다유체 1차원 압축성 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, Laroutrou가 해결 못한 기체와 기체 경계에서의 압력교란 현상을 억제시켰다. Abgrall (1996) 역시 두 기체의 1차원 압축성 유동을 대상으로 기체 간 경계 압력 교란을 억제하는 방안을 제시하였다. 비 보존형태 지배식을 이산화 하는 Karni (1994) 방식으로는 강렬한 충격파가 존재할 경우에 파 전파속도나 세기에 큰 오차가 발생한다 (Abgrall 1996). Euler 식은 보존형태로 이산화 하되, 비열비는 γ 자체가 아닌 $1/(1-\gamma)$ 의 수동수송식을 이산화 하는 방안을 제시하여 앞에 언급한 문제를 해결하였다. 그러나 $1/(1-\gamma)$ 의 이산화식에 기체 경계 압력 교란을 억제하기 위해 특별한 항들이 나타나는 점과 이 항들이 Euler 식의 이산화 알고리즘과 연계되어 유도된다는 제약이 따른다. Karni (1996)는 보존형 Euler 식과 보존형 질량분율식을 이산화 하되, 질량분율식 이산화에 Laroutrou와 같은 특별한 조치를 취하지 않았다. 대신 기체 경계에서는 압력을 상태방정식이 아닌 압력방정식, $p_t + up_x + \gamma pu_x = 0$ 의 이산화식으로부터 직접 구하여 두 기체의 1차원 압축성 유동 수치해석에 나타나는 압력교란 현상을 피하였다.

본 연구에서는 2차원 다상 또는 다유체 압축성 유동에 대해 상경계를 체적분율을 통해 포착하는 수치해석코드를 개발하였다. 격자계는 Eulerian 고정격자계로서 이동격자는 구현되어 있지 못하다. 상경계 압력파동은 Miller and Puckett (1996)의 압

력 이완(pressure relaxation) 방법으로 제거하였다. 체적분율을 조절하면서 다유체셀 내 각 상의 압력을 직접적으로 평형시키는 방법이다.

Fluent에서와 같이 체적분율(volume fraction)을 통해 기체와 액체의 상경계를 추적하는 VOF 모델이며, 점성과 열전도성을 무시한, 즉 모멘텀 및 열 확산항이 없는 Euler 지배방정식을 이산화한 프로그램이다. 압축성 유동 해석에 필요한 상태방정식으로 공기와 물에 동일한 형태로 적용할 수 있는 Tait 상태방정식, $p = (\gamma - 1)\rho e - \gamma B$; p 압력, ρ 밀도, e 단위질량당 내부에너지, 을 사용하였으며 압축성 물성치인 γ 와 B 는 상경계 압력평형 조건으로부터 유도되는 체적분율의 대수식으로 표현하여 공기-물 이상유동을 단상유동처럼 처리한다.

고압 공기탱크의 밸브를 열면 공기가 팽창하면서 저압의 물이 차 있는 관내로 흘러들고 이에 앞서 공기탱크의 고압은 압력파로서 물 속을 전진하여 관 내 이동체와 부딪힐 것이다. 이때부터 물체는 가속도를 얻어 움직이기 시작한다. 공기는 물론 물의 압축성이 함께 반영되어 있지 않은 해석 프로그램으로는 이와 같은 초기 거동을 예측할 수 없다. 물을 비압축성으로 취급하는 현 Fluent VOF 모델을 사용하면 압력파의 전파속도가 무한한 결과로서 밸브와 이동체 간 거리에 관계없이 밸브 개방 즉시 물체에 압력이 전달되어 가속이 시작된다. 한편 자체개발 코드를 실제 상황에 적용하기 위해서는 확산항 추가, 3차원에서의 확장, 이동격자계 구현 등 적지 않는 시간과 노력이 더 필요하다. 물을 비압축성으로 간주하여도 무방한 대상 또는 자료와 압축성을 무시하면 오차가 크게 발생하는 자료인가를 미리 판별할 수 있다면, 전자의 경우 이동물체-유동 상호작용을 포함한 3차원 실제 문제를 Fluent 상용코드를 사용하여 해결할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 압축공기 분사로 움직이는 관 내부 수중 이동물체의 거동(가속도, 속도, 변위)에 대하여 물의 압축성을 고려한 경우와 비압축성으로 처리한 결과를 전자는 자체 개발 프로그램을 사용하고 후자는 Fluent를 통해 계산하여 압축성이 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 2차원 대상문제 및 수치해석모델

수치해석을 위해 문제를 2차원으로 이상화하였으며 선정한 문제의 단면형상 및 치수, 초기조건을 Fig. 1에 나타내었다. 공기탱크는 길이 L_a , 폭 $\sqrt{A_a}$ 를 갖는 사각단면으로 설정하였으며, 초기 저압의 물이 차 있는 관 역시 길이 L_w , 폭 $\sqrt{A_w}$ 인 사각단면으로 공기탱크와 밸브를 통하여 연결되도록 하였다. 밸브는 공기탱크 단면 중심에 그림과 같이 배치하였으며, 밸브 길이는 L_v , 폭은 W_v 로 표기하였다. 초기 공기의 압력과 밀도는 200 bar, 200 kg/m^3 , 물의 초기상태는 10 bar, 1000 kg/m^3 로 설정하였다. 밸브가 물 관과 만나는 면을 가상의 격막으로 간주하여 시간 $t=0$ 에 순간적으로 파열되는 것으로 설정하였다.

Fig. 1에서 물 관 길이 L_w 방향으로 밸브로부터 멀리 위치한 면을 관 내 이동강체의 후면(rear section of projectile)으로 간주하여, 이 면의 거동을 이동체의 질량으로 100 kg, 전후면 단면적 0.1 m^2 로 선정하여 유동장으로부터 계산되는 이동체 후면 평균압력과 전면 배경압과의 차를 동일한 것으로 계산하였다. 이동체 전면 배경압은 물의 초

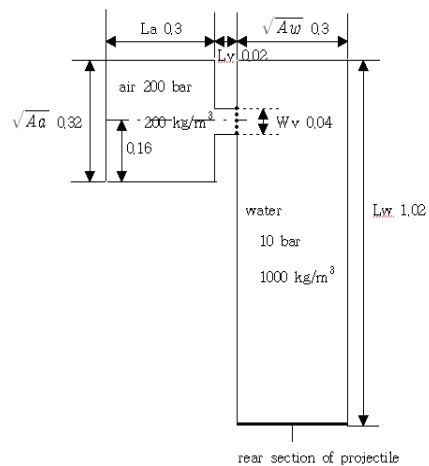


Fig. 1 2-Dimensional calculation model (length unit: m)

기압과 동일하도록 10 bar를 사용하였으며 이동면 이 약 0.2 m 전진하는 시간까지 수치해석을 진행하였다. 자체 수치해석모델과 Fluent VOF 모델에 동일한 격자구조를 사용하였으며 밸브 내부는 1×1 cm, 밸브 길이에 연한 수평구역은 1×2 cm, 이 외 구역은 2×2 cm 셀 구조이다.

물의 압축성이 반영되는 자체개발 수치코드는 고정격자계로 되어 있어 이동면 벽경계조건(이동면 속도)을 강체운동으로부터 계산된 변위에 대응하는 전진위치가 아닌 원위치에서 적용하게 된다. Fluent VOF 모델을 이용한 계산에서는 이동면 벽경계조건을 Fluent의 이동격자계 기능을 사용하여 실제 계산된 변경위치에 적용한다. 두 결과의 비교를 통해 이동면 경계조건 적용위치 차이에 따른 강체거동에의 영향과 물의 압축성이 거동에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

체적분율을 통해 상경계를 포착하며 이상유동을 해석하는 VOF 모델에서 사용하는 보존식들은 형태가 단상유동과 다르지 않다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial (\rho e + \rho v^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial ((\rho e + \rho v^2/2 + p)v_j)}{\partial x_j}$$

$$= - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{\partial (v_j \tau_{ij})}{\partial x_j}, \quad q_j = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (1c)$$

자체 VOF 모델은 운동량 보존식 (1b)와 에너지 보존식 (1c)의 우변 확산항이 없는 Euler 지배식을 이산화한 코드이다. Fluent에서 점성 μ 와 열전도성 k 는 체적분율 α_1 과 α_2 ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$)의 가중평균값을 적용한다, 즉, $\mu = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \mu_i$, $k = \sum \alpha_i k_i$.

공기와 물의 압축성을 모두 고려하는 개발코드에서는 보존변수인 밀도 ρ , 운동량 ρv_i , 단위부피

Table 1 Comparison of Fluent VOF and present VOF models

	Fluent VOF	present VOF
molecular diffusion	viscous thermal diffusion	inviscid no thermal diffusion
compressibility	air compressible (ideal gas) water incompressible	air compressible (ideal gas) water compressible (Tait eq. of states)
volume fraction eq. & update	passive advection eq. geometric reconstruction +passive advection	compressible volume fraction eq. geometric reconstruction +passive advection +pressure relaxation
dimension	3D possible	1D or 2D only
moving mesh	possible	impossible (Eulerian grid)

당 총에너지 $\rho e + \rho v^2/2$ 를 구한 후 압력을 계산한다. 공기로 채워진 셀이면 ($\alpha_1 = 1$) 이상기체 상태 방정식 $p = (\tau_1 - 1)\rho e$, 물로 가득한 경우에는 ($\alpha_2 = 1$) Tait 상태식 $p = (\tau_2 - 1)\rho e - \tau_2 B_2$ 으로부터 압력을 구한다. 이때 압축성 물성치 $\gamma_1 = 1.4$, 물에 대해서는 $\gamma_2 = 7$, $B_2 = 3 \times 10^8 Pa$ 을 사용하였다 (Grove and Menikoff 1990). 공기와 물이 공존하는 셀에서는 상경계 압력평형조건 으로부터 유도되는 다음 등가 상태식을 사용한다.

$$p = (\gamma - 1)\rho e - \gamma B \quad (2a)$$

$$\frac{1}{\gamma - 1} = \sum \frac{\alpha_i}{\gamma_i - 1} \quad \frac{\gamma B}{\gamma - 1} = \sum \frac{\tau_i B_i \alpha_i}{\tau_i - 1} \quad (2b)$$

물을 비압축성으로 취급하는 Fluent에서는 연속

방정식과 운동량 보존식으로부터 압력을 먼저 구한 후 밀도를 계산한다, 식 (3a). R 은 공기 기체 상수이다. 내부에너지는 식 (3b)와 같이 정적비열과 온도의 함수로 처리한다.

$$\rho = \sum \sigma_i \rho_i \quad \rho_1 = \frac{p}{RT} \quad \rho_2 = constant \quad (3a)$$

$$\rho e = \sum \sigma_i \rho_i e_i \quad e_1 = c_{v1} T \quad e_2 = c_{v2} T \quad (3b)$$

Fluent는 식 (3a)와 (3b)에 필요한 체적분율 중에서 비압축성 매질의 체적분율 α_2 를 다음 관계식을 통해 구한다.

$$\frac{\partial(\alpha_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_2 v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

이에 반해 자체코드는 물의 압축성을 고려하는 체적분율식 (5)를 이산화하여 식 (2a), (2b)의 혼합상 물성치 γ 와 B 를 구한다.

$$\frac{\partial(\alpha_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_2 v_j)}{\partial x_j} = \alpha_2 \frac{\Gamma}{T_2} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \quad (5)$$

Γ_2 은 물의 등엔트로피 발크 모듈러스 (isentropic bulk modulus)이며, $\Gamma_2 \equiv \rho_2 c_2^2 = \gamma_2 (p + B_2)$, Γ 는 질량분율을 고정 한 상태에서 유도되는 혼합상 발크 모듈러스이다, $\Gamma \equiv \rho c^2 = 1 / \sum \frac{\alpha_i}{\Gamma_i}$.

각 유체의 상대적 압축성을 반영하는 항이 식 (5)의 우변이다. 여기서 c_2 는 물의 음속, c 는 물과 공기가 균일하게 (homogeneous) 혼합된 상태에서의 음파 전진속도에 해당한다.

개발모델에서 체적분율식으로 수동수송 (passive advection)이 아닌 압축성이 반영된 식을 사용하고 다음 시간대 체적분율 계산시 압력이완 (pressure relaxation) 과정을 거치는 까닭은 그렇지 않을 경우 상경계에서 비 물리적 압력교란이 발생하기 때문이다. 이와 관련한 사항은 문헌 (2)에 상세히 기술되어 있다.

적분 시간간격은 체적분율 외의 모든 보존식을 Implicit 방식으로 처리하는 Fluent 계산시 테스트 (시간스텝당 수렴도달 반복회수 약 50회 이내)를

거쳐 100 μ s로 선정하였다. 자체 Explicit 코드는 CFL값이 최대 0.5로 고정되어 있으며 본 계산의 경우 대략 3 μ s (셀크기 1 cm, 물 음속 1450 m/s) 간격으로 적분이 진행된다.

3. 이동체 거동 계산결과

Fluent 및 자체 VOF 코드를 이용하여 계산한 이동체 거동을 Fig. 2에 제시하였다. 이동면 가속도, 속도, 변위를 나타내었으며 가로축은 시간 (ms; millisecond) 좌표이다. 시간이 경과함에 따라 두 결과의 유사성이 부각되고 있으며 특히 속도에서 그 차이가 뚜렷하게 좁아짐을 볼 수 있다.

첫 압력파가 이동면에 도달하는 시간은 대략 0.7 ms (Lw 1.02 m, 물 음속 1450 m/s) 이다. 이때까지 물의 압축성이 고려된 자체코드의 가속도, 속도, 변위가 모두 0인 점이 관찰된다. 또한 약 1.4 ms 주기로 가속도의 크기가 변하고 있는데 음파가 길이 Lw 방향으로 물 속을 왕복하는 시간이다.

이에 반해 Fluent로 계산된 가속도는 첫 시간스텝 경과 순간의 19,000 m/s^2 ((200-10) bar \times 0.1 $m^2 \div 100$ kg)을 필두로 매 시간간격마다 큰 폭으로 값의 증감을 반복하는 것이 처음 3 ms 경과시 까지 보인다. 고압에 의해 이동면이 움직이는 순간 해당 유속을 유발하기 위해 이동면의 압력이 크게 떨어지면 이동면이 감속하고 이에 따라 면 주위 유속 또한 감속시키기 위해 압력이 재차 급하게 형성되는 과정이 되풀이 된다. 비압축성 유체 내에서 연속방정식을 만족시키는데 따르는 현상으로 판단된다. 한편 매순간 가속도 수치가 크게 변함에도 불구하고 진폭 중간의 궤적이 1.4 ms 내외 주기로 변하는 개발코드 가속도의 중간 궤적과 거의 유사함을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 첫 압력파가 이동면에 도달하는 과정과 도달 후 반사하면서 이동면의 압력을 상승시키는 밸브 파열 후 처음 1 ms까지의 압력분포를 보여준다. 0.4 ms 경과하기까지 우측 아래 부위에 해당하는 이동물체 후면에 압력파가 아직 달지 않고 있다. 이 과정에서 밸브 맞은 편 벽에 반사되어 이 부분의 압력이 급히 상승하는 모습을 볼 수

있다. 또한 이동체 후면을 향하는 압력파의 전반부 형태가 0.2 ms에서 보다 0.4 ms에서 불연속적 단이 심화되는 경향을 보인다. 점진적인 압력파로부터 충격파로 전이되는 반증이다. 0.6 ms 압력분포도로부터 압력파가 이동체에 도달한 사실을 알 수 있고 이후 1 ms 경과하기까지 이동면의 압력이 급히 상승하고 있다. 물을 비압축성으로 취급하는 Fluent VOF 모델로는 이와 같은 초기 압력파 전파과정의 포착이 원천적으로 불가능하다.

Table 2에 4.2 ms와 8.4 ms인 순간의 이동체 거동을 수치로 제시하였다. 괄호 안의 값은 개발 코드에 의한 결과치를 1로 기준한 상대수치이다.

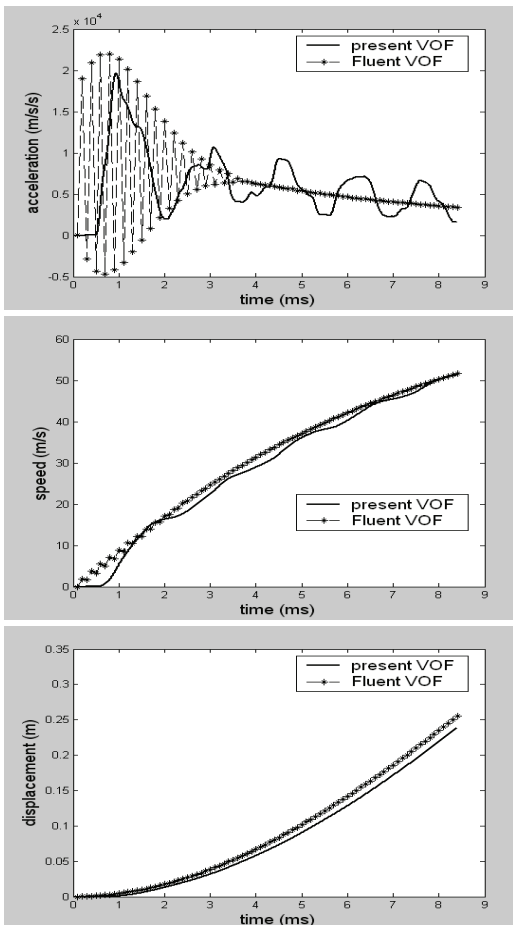


Fig. 2 Behavior of rear section of projectile

4.2 ms는 음파가 대략 2회 관 길이 Lw를 왕복한 시간이며 8.4 ms는 5주기 경과시간에 해당한다.

이동체 속도와 변위의 두 결과 간 차이가 4.2 ms에 비해 8.4 ms에서 현저히 줄어들고 있다. 속도의 경우 10.8% 차이에서 2.3%로, 변위차는 19.1%에서 9.4%로 좁혀진다. 관 내 음파 5회 왕복시간인 8.4 ms에서 Fluent와 자체코드 간 속도 차이는 3%를 넘지 않으며 변위차 또한 10% 이내이다.

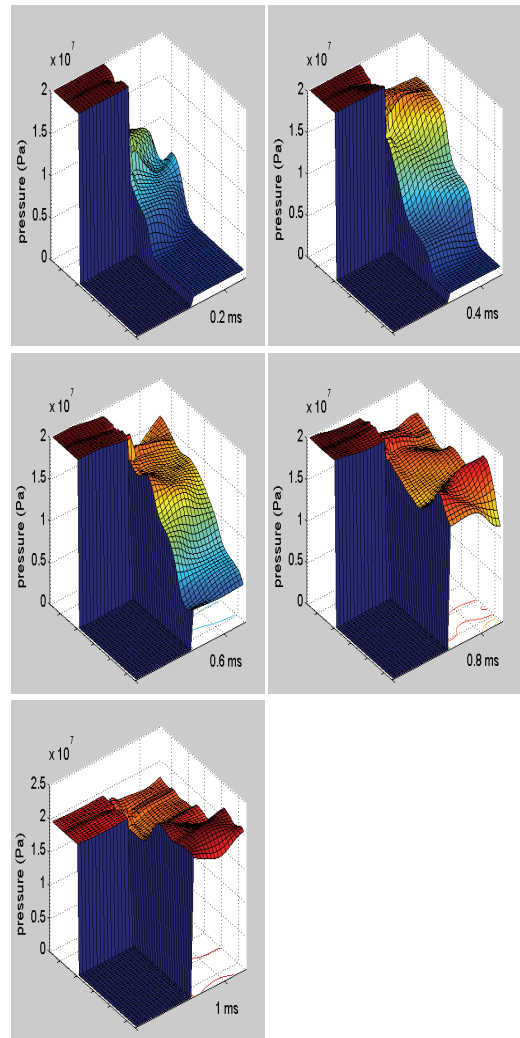


Fig. 3 Pressure distribution up to 1 ms after valve opening (present VOF)

Table 2 Behavior of rear section of projectile at 4.2 ms and 8.4 ms

		4.2 ms	8.4 ms
acceleration (m/s ²)	Fluent	6060 (1.195)	3390 (1.389)
	present	5070 (1)	2440 (1)
speed (m/s)	Fluent	32.6 (1.108)	51.6 (1.023)
	present	29.4 (1)	50.4 (1)
displacement (m)	Fluent	0.0734 (1.191)	0.255 (1.094)
	present	0.0616 (1)	0.233 (1)

자체코드 결과는 이동면 경계조건을 변경된 위치가 아닌 원위치에 적용한다. 이를 Fluent에서와 같이 실제 전진위치에 적용한다면 압력원인 고압 공기탱크로부터 점차 멀어지는 결과로서 속도나 변위가 보다 낮은 수치를 보일 것이며, 이로 인해 상대적으로 높은 값을 보이는 Fluent 결과와의 차이가 앞에 제시한 백분율보다 증폭된다. 물을 비압축성으로 취급하는 Fluent VOF 모델을 사용하면 실제 물의 압축성을 고려하는 경우에 비하여 이동체의 속도 및 변위를 과대 계산하게 됨을 의미한다. 반면 시간이 경과하면서 두 모델 간 상대적 백분율 차이가 줄어드는 경향은 변치 않을 것이며, 물 관 내에서 음파가 수 회 왕복하는 동안의 극히 초기 거동을 제외하고는 물의 압축성을 고려하지 않는 Fluent VOF 모델을 통해서도 관내 이동체의 속도 및 변위를 비교적 정량적으로 예측할 수 있다.

Fig. 4는 8.4 ms인 순간의 체적분율 분포도이다. 두 모델 모두 변하지 않은 날카로운 상경계를 보이고 있다. 상경계 기하적 재구성을 거친 결과이다(Park and Lee 2008). 상경계의 전반적인 형상은 유사하나 물 관 내 좌측벽 근처에서 개발코드에 의한 상경계가 이동면 방향으로 점성 등 확산항이 고려되는 Fluent 결과에 비해 상당히 전진한 것을 볼 수 있다. 유체 점성의 효과가 드러나는 부위이다. 물 또는 공기의 동점성계수는 10^{-5} - 10^{-6} m²/s 으로 매우 작아 확산 시간스케일 l^2/ν (l 특성길이, ν 동점성계수)이 벽에서 1 mm 만 벗어나도 0.1-1 s 정도로 크며, 0.01 s (10 ms)의 극히 짧은 동안의 이동체 거동에 미치

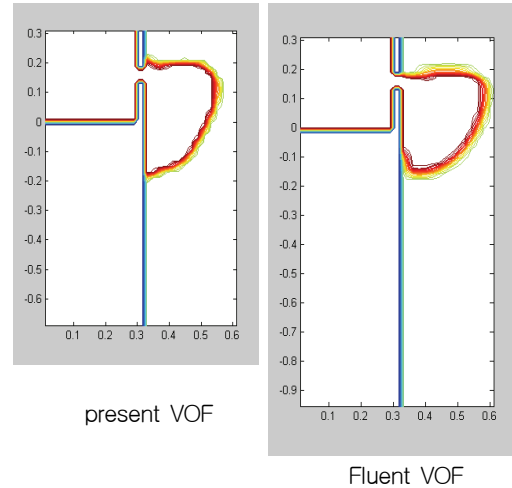


Fig. 4 Volume fraction contours at 8.4 ms

는 확산항의 효과는 무시될 수 있다.

4. 결론

공기탱크 내 고압의 압축공기를 순간적으로 밸브를 개방하여 관 내 저압의 물에 분사시켜 이로부터 강체를 관 외부로 이탈시키는 경우에 물의 압축성이 이동물체의 거동에 미치는 영향을 수치 계산을 통하여 살펴보았다. 물의 압축성을 고려한 거동은 자체 개발 VOF 수치코드를 사용하여 계산하였으며 이를 비압축성으로 처리한 결과는 Fluent VOF 모델을 이용하여 추출하였다.

물을 비압축성으로 취급하는 Fluent VOF 모델을 사용하면 실제 물의 압축성을 고려하는 경우에 비하여 이동체의 초기 속도 및 변위를 과대 계산하게 된다. 그럼에도 시간이 지날수록 두 모델 간 상대적 백분율 차이가 줄어드는 경향이 뚜렷이 나타나며 물 관 내에서 압력파가 수 회 왕복하는 동안의 극히 초기 거동을 제외하면 물의 압축성을 고려하지 못하는 Fluent 코드를 통해서도 관내 이동체의 속도 및 변위에 대한 정량적 예측이 가능하다.

가속도의 경우에는 물에서의 압력파를 구현하지 못하는 연유로 초기 거동은 물론 이후 상당 시간 Fluent 결과와 물의 압축성을 고려하는 개발코드 결과 간 차이가 뚜렷이 부각된다.

후 기

본 논문은 수중운동체 특화 연구센터의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- Abgrall, R., 1996, "How to Prevent Pressure Oscillations in Multicomponent Flows: A Quasi Conservative Approach," Journal of Computational Physics, Vol. 125, No.1, pp. 150-160.
- Cho, K., Hong, S., Kim, J. and Park, I.R., 2006, "A Numerical Study on the Coupled Dynamics of Ship and Flooding Water," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 43, No. 6, pp. 631-637.
- Fluent Incorporated, 2006, FLUENT 6.3 User's Guide.
- Grove, J.W. and Menikoff, R., 1990, "Anomalous Reflection of a Shock Wave at a Fluid Interface," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 219, pp. 313-336.
- Karni, S., 1994, "Multi-component Flow Calculations by a Consistent Primitive Algorithm," Journal of Computational Physics, Vol. 112, No. 1, pp. 31-43.
- Karni, S., 1996, "Hybrid Multifluid Algorithm," SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 17, No. 5, pp. 1019.
- Kim, B.N, Park, J.H. and Kim, W.J, 2007, "Calculation of Flows around Container Ship Models with Different Reynolds Numbers," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 258-266.
- Laroutou, B., 1991, "How to Preserve the Mass Fraction Positive When Computing Compressible Multi-component Flows," Journal of Computational Physics, Vol. 95, pp. 59-84.
- Miller, G.H. and Puckett, E.G., 1996, "A High-Order Godunov Method for Multiple Condensed Phases," Journal of Computational Physics, Vol. 128, pp. 134-164.
- Park, C.W. and Lee, S., 2008, "Numerical Analysis for Two-Dimensional Compressible and Two-Phase Flow Fields of Air-Water in Eulerian Grid Framework," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 32, No. 6, pp. 429-445.
- Park, I.R, Kim W.J., Kim, J. and Van, S.H., 2005, "A Study on a VOF Method for the Improvement of Free Surface Capturing," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 88-97.



< 박 찬 욱 >



< 이 승 수 >