

캐비테이션 유동해석을 위한 기-액 2상 국소균질 모델 제2보: 기-액 2상 매체중의 고속유동현상

신 병 록,^{*1} 박 선 호,² 이 신 형³

¹유동정보연구소

²한국해양대학교 해양공학과

³서울대학교 조선해양공학과

GAS-LIQUID TWO-PHASE HOMOGENEOUS MODEL FOR CAVITATING FLOW Part II. HIGH SPEED FLOW PHENOMENA IN GAS-LIQUID TWO-PHASE MEDIA

B.R. Shin,^{*1} S. Park² and S.H. Rhee³

¹Institute of Flow Informatics

²Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.

³Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul Nat'l Univ.

A high resolution numerical method aimed at solving cavitating flow was proposed and applied to gas-liquid two-phase shock tube problem with arbitrary void fraction. The present method with compressibility effects employs a finite-difference 4th-order Runge-Kutta method and Roe's flux difference splitting approximation with the MUSCL TVD scheme. The Jacobian matrix from the inviscid flux of constitute equation is diagonalized analytically and the speed of sound for the two-phase media is derived by eigenvalues. So that the present method is appropriate for the extension of high order upwind schemes based on the characteristic theory. By this method, a Riemann problem for Euler equations of one dimensional shock tube was computed. Numerical results of high speed flow phenomena such as detailed observations of shock and expansion wave propagations through the gas-liquid two-phase media and some data related to computational efficiency are made. Comparisons of predicted results and solutions at isothermal condition are provided and discussed.

Key Words : 압축성 유동(Compressible Flow), 기-액 2상류(Gas-Liquid Two-phase Flow), 캐비테이션 유동(Cavitating Flow), 균질모델(Homogeneous Model), MUSCL TVD 해법(MUSCL TVD Scheme), Runge-Kutta 법(Runge-Kutta Method), 상태방정식(Equation of State), Riemann 문제(Riemann Problem)

1. 서 론

과학기술 발전의 가속화와 함께 유체기계 및 기기에 대한 신뢰성, 적합성, 다양성의 향상이 끊임없이 요구되고 있다. 특히 액체를 매체로 하는 터보기계 및 추진 기계에 있어서는 이들이 고속화되어 감에 따라 캐비테이션 발생의 가능성이 증대되고 있으며, 캐비테이션 기포의 성장과 소멸 과정으로

인한 복잡하고도 강한 비정상성 때문에 유체기계의 성능저하가 초래된다. 예를 들면, 캐비테이션 기포가 붕괴될 때는 짧은 시간에 수 GPa에 이르는 높은 충격압이 발생된다. 이 충격압은 보통 펌프, 하이드로 터빈 및 프로펠러, 배관시스템, 수중 운동체와 같은 유체기계·기기의 표면에 치명적인 손상을 입히며, 소음과 진동을 초래하여 결국 유체 고안물의 성능, 운전, 제어 등에 나쁜 영향을 미칠 뿐 아니라 일련의 캐비테이션 현상에 관계되는 다양한 문제를 야기한다. 이와 같은 캐비테이션 침식, 마모 등 이른바 캐비테이션 손상은 유체와 재료간의 복잡 연성계의 문제이기도하여 학제적인 관점에서 그 접근이 요구되고 있다. 그러나 이 캐비테이션 충격압은 모재에 악영향을 주는 반면, 액체 속에 부유하고 있는 박테리

Received: September 11, 2014, Revised: September 23, 2014,

Accepted: September 23, 2014.

* Corresponding author, E-mail: shin@flowlab.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2014.19.3.091>

© KSCFE 2014

아를 박멸하고 신장결석을 분쇄하며 재료의 표면을 개질 하는데 유효하게 활용할 수도 있어 의학, 환경, 공학 분야에서 이를 이용하려는 연구가 요 몇 년 새에 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 캐비테이션은 고속유동 상태하에 있는 유체기계·기기의 성능개선은 물론, 수명의 예측과 안전, 또는 충격과활용 기기 등의 신뢰성 확보란 관점에서 설계자, 제조자는 물론 사용자에 있어서도 지극히 중요한 공통과제라는 인식하에 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

이상과 같은 캐비테이션 유동현상은 초고속 복잡 현상으로 전산해석에 의한 연구가 적합하다. 그러나 본래 캐비테이션 거동 자체가 팽창-응축-상호 간섭으로 말미암아 비정상성이 강하고, 이를 포함하는 유동은 넓은 범위의 밀도와 음속변화에 따른 압축성과 비압축성 유동의 성격이 공존하기 때문에, 이에 대한 수치해석이 매우 어렵다. 말할 것도 없이, 이러한 유동을 나타내는 보편적인 지배방정식은 존재하지 않는다. 이 때문에, 어떤 형식이든 캐비테이션 유동을 다룰 수 있는 모델이 필요한데, 현재까지 크게 나누어 2가지 모델 즉, 캐비테이션 기포의 기-액 계면 추적법과 계면 포획법에 의한 모델이 제안되어 있다. 이 중에서 계면 추적법은 캐비테이션 영역을 일정한 국소 증기압으로 대체하고 기-액 계면을 경계로 취급하여 액상영역만을 계산한다는 잇점이 있다. 이 때, 계면은 계면을 따라 일정한 압력으로 수렴 될 때까지 반복 갱신된다. 그러나 이 방법은 캐비테이션의 후미부분에서 압력이 회복되는 경우까지만 캐비티 계면 전체에 일정 압력조건을 부과하는 것은 불가능하므로 캐비테이션 후미영역에서 2상 거동을 나타내기 위한 일종의 후류폐쇄 모델 (wake closure model)이 필요하다[1,2]. 캐비티의 이탈 지점이나 압력분포와 같은 몇몇 캐비테이션 유동 특성을 예측할 수 있으나 2차원의 안정된 sheet 캐비테이션에만 적용할 수 있다는 단점이 있다.

한편, 계면 포획법은 기본적으로 각 상에 대하여 서로 다른 방정식으로 기술되는 Eulerian 방법이 널리 이용된다. 캐비티 전 영역의 형상을 방정식의 한 해의 일부로써 나타내게 되므로 이 방법의 큰 매력은 후류폐쇄 모델을 필요로 하지 않는다는 데에 있다. 이 방법은 적용하는 지배방정식에 따라 다시 2 유체모델과 혼합유체 모델 그룹으로 나뉜다. 첫 번째 그룹은 각 상에 각각의 성격에 맞는 보존방정식이 적용되고 경계면의 상호작용을 source항의 첨가로 나타낸다[3]. 반면 혼합유체 그룹은 넓은 범위의 밀도 변화를 허용함으로써 기상과 액상, 그 혼합상 모두를 단일 혼합유체로 취급한다. 혼합상으로 구성된 각 계산 셀 내에서 매질은 균질하고 셀과 과셀사이를 no-slip으로 간주한 균질 모델(homogeneous model)이고, 기-액 2상 매체를 다루면서도 단상 유동과 같이 단일 혼합매체에 대한 방정식 하나만으로 나타낼 수 있는 의단상모델(pseudo-shingle phase model)이다. 이 방법에는 다시 밀도변

화의 포획방법에 따라, 상태방정식을 통하여 기상과 액상사이의 밀도 변화를 단일 혼합체 연속방정식을 이용하여 구하는 방법과[4,5], 각 상의 거동을 나타내기 위하여 각기 구성된 각각의 연속방정식을 푸는 방법이 있다. 후자는 source항의 도입으로 기상과 액상 사이의 물질전달을 조절하거나[6,7] 단순화된 Eulerian형태의 Reyleigh-Plesset 방정식으로 기포군의 변화를 조절한다[8,9]. 원리적인 관점에서 계면 포획법은 모든 형태의 캐비테이션에 적용할 수 있다.

최근 Shin et al.[10] 등은 캐비테이션 유동의 복잡한 고속현상의 상세한 해명을 목적으로 균질형 캐비테이션모델을 제안하고 여러 조건의 캐비테이션 유동의 계산을 통하여 검증하였다[11-15]. 본 연구에서는 위의 캐비테이션 모델을 갖는 밀도기반의 쌍곡형 고해상도 차분해법에 대하여, 등온과정에 대하여 논의한 전보[16]에 이어 Full Euler식에 적용하고 넓은 범위의 void율에 대한 충격과관 문제를 통하여 기-액 2상 매질에서의 충격과 전과특성들에 대하여 상세히 조사한다.

2. 기-액 2상 국소균질 모델

전보[16]에서 상세히 기술한 공기-물계의 기-액 2상 매체에 대한 상태방정식은 국소균질의 가정에 따라 다음과 같이 유도된다.

$$\rho = \frac{p(p+p_c)}{K(1-Y)p(T+T_c) + RY(p+p_c)T} \quad (1)$$

여기서, ρ, p, T 는 각각 혼합매체의 밀도, 압력, 온도를 나타낸다. K, T_c, p_c 는 각각 물에 대한 액체상수, 온도상수, 압력상수로 20°C의 경우 472.27J/kgK, 387K, 1944.61MPa로 평가되고, R 은 기체상수이다. 또한 Y 는 혼합매체의 quality (기체의 질량분율)를 나타내는 것으로 $Y=1$ 일 때는 이상기체에 대한 상태방정식 $p = \rho_g RT$ 가 성립하고, $Y=0$ 일 때는 액상을 물(water)에 대하여 잘 맞는 것으로 알려진 Tamman형[17] 상태방정식 $p+p_c = \rho_l K(T+T_c)$ 가 성립한다. 여기서 아래 첨자 g 는 기체상태를, l 은 액상을 나타낸다.

또한 기-액 2상 매체에 대한 단열 음속은 열역학적 관계식을 이용하여 엄밀하게 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다 [16].

$$c^2 = \left. \frac{dp}{d\rho} \right|_s = \frac{\rho C_p}{\rho_T + \rho C_p \rho_p} \quad (2)$$

여기서,

$$\rho_T = \frac{-\rho\{K(1-Y)p + RY(p+p_c)\}}{D}$$

$$\rho_p = \frac{(p+p_c)^2 RYT + p^2 K(1-Y)(T+T_c)}{D^2}$$

단, $D = K(1-Y)p(T+T_c) + RY(p+p_c)T$ 이고, 2상 매체의 정압비열 C_p 는 $C_p = YC_{pg} + (1-Y)C_{pl}$ 이다.

3. 수치해법

3.1 기초방정식

위에서 설명한 본 모델을 이용함으로써 기-액 2상 국소균질매체의 기초방정식은 단상 압축성유동의 기초방정식과 유사한 형식으로 나타낼 수 있다. 즉, 간단히 1차원 충격파관 문제를 생각하면, 그 지배방정식은 압축성 Euler방정식에 기상의 질량보존의 식을 더하여 아래와 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

여기서, t 는 시간, x 는 직교좌표계이고, Q 는 미지변수 벡터, E 는 유량(flux)벡터로 각각 다음과 같다.

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \\ \rho Y \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (e+p)u \\ \rho u Y \end{pmatrix}$$

식 (3)의 네 번째 식이 기상의 질량보존식, u 는 속도이다.

압축성유동, 특히 충격파를 동반하는 고속유동을 수치해석 하는데 있어서는 특성의 이론(characteristic theory)이 그 해석의 중심에 위치한다할 수 있다. 이는 유량벡터 E 의 대각화 및 상류화가 그들의 특성속도(characteristic velocity) 즉 고유치(eigenvalue)를 바탕으로 평가되기 때문이다. 특성의 이론은 비보존형으로 쓰여진 쌍곡형 식에 대하여 적용되므로, 유량벡터를 특성선상을 전파하는 속도(고유치)를 써서 표현할 필요가 있고, 그러기 위하여 우선 식 (3)의 유량벡터를 Euler의 동차관계 (Euler's homogeneous relation)를 이용하여 다음과 같이 선형화 한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{4}$$

여기서 $A = \partial E / \partial Q$ 로 정의되는 Jacobi행렬이다. 구체적으로는 다음과 같다.

$$A = \frac{\partial E}{\partial Q} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -u^2 + p_\rho & 2u + p_{\rho u} & p_c & p_{\rho Y} \\ -uH + up_\rho & H + up_{\rho u} & u + up_c & up_{\rho Y} \\ -uY & Y & 0 & u \end{pmatrix} \tag{5}$$

식 (5)에서 아래첨자는 1계 편미분을 의미하는 것으로 예를 들면 $p_{xy} = \partial p / \partial (xy)$ 이고, H 는 전에너지 $e = \rho H - p$ 에 의해 정의되는 enthalpy이다. 여기서 A 는 대각화가 가능함을 계산을 통하여 확인 할 수 있으며 고유치로부터 구성되는 대각행렬과 고유벡터를 구할 수 있다. 또 고유치로부터 구한 음속 c 는

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} + u \frac{\partial p}{\partial (\rho u)} + H \frac{\partial p}{\partial e} + Y \frac{\partial p}{\partial (\rho Y)} \tag{6}$$

로 나타낼 수 있고, 이를 생태방정식 (1)을 이용하여 정리하면 열역학적 관계식을 이용하여 유도한 음속 식 (2)와 일치함을 확인할 수 있다.

3.2 수치해법

위의 기초식에 대하여 전보[16]에서와 마찬가지로 넓은 범위의 void를 갖는 충격파관 문제의 고해상도 안정 해석을 위하여, 3차 정확도의 MUSCL TVD법[18]에 의한 Roe의 FDS법 [19]과 4차 정확도의 Runge-Kutta법[20]을 적용하고 기-액 2상 매체중의 고속유동현상을 해석한다.

지금, 식 (3)의 유량벡터 E 에 대한 공간 위치 i 에서의 차분식은 $\partial E / \partial x = (E_{i+1/2} - E_{i-1/2}) / \Delta x$ 와 같이 나타낼 수 있고, 예를 들어 수치유량(numerical flux) $E_{i+1/2}$ 를 Roe의 FDS를 적용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$E_{i+1/2} = \frac{1}{2} [E(Q_{i+1/2}^L) + E(Q_{i+1/2}^R) - |A_{i+1/2}| (Q_{i+1/2}^R - Q_{i+1/2}^L)] \tag{7}$$

여기서 A 는 위에서 소개한 Jacobi행렬로, 각 성분은 밀도의 평방근으로 평가한 Roe의 평균값으로 구한다. 실제 계산에서 $|A|$ 는 $A = L^{-1}AL$ 와 같이 대각화를 통한 고유치(Λ)와 고유벡터(L, L^{-1})를 이용하여 계산한다. 또, 좌우 셀 경계에서의 물리량 $Q_{i+1/2}^L$ 과 $Q_{i+1/2}^R$ 은 최대 3차 정확도의 공간 해상도를 얻을 수 있는 MUSCL TVD법[18]을 이용하여 구한다.

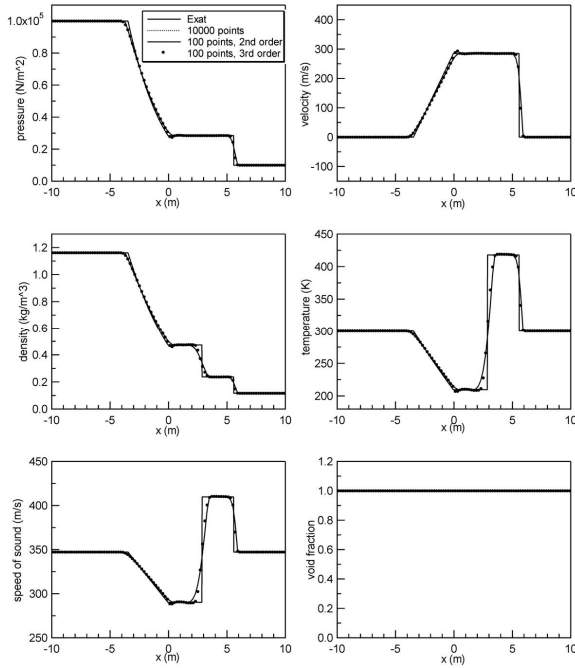


Fig. 1 Computational results of pressure, density, velocity, temperature, speed of sound and void fraction distribution for ideal gas ($\alpha_i = 100\%$) at time $t=0.01s$

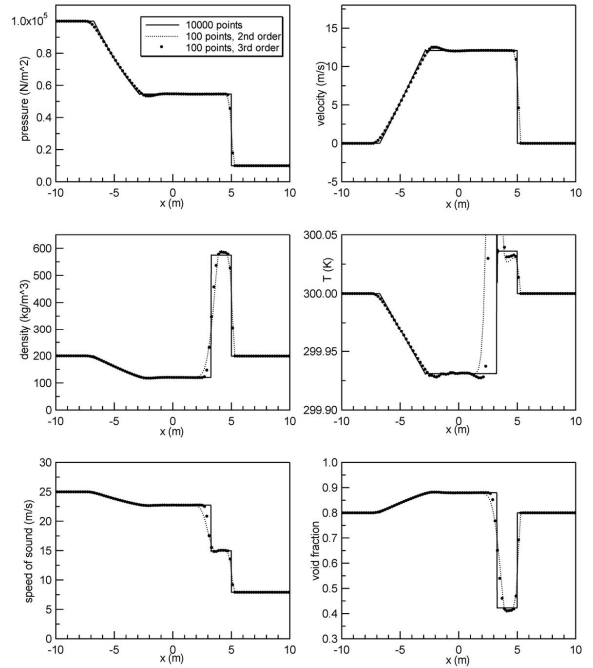


Fig. 2 Computational results of pressure, density, velocity, temperature, speed of sound and void fraction distribution for gas-liquid 2-phase media at $\alpha_i = 80\%$, time $t=0.27s$

$$Q_{i+1/2}^L = Q_i + \frac{1}{4}[(1-\kappa)D^+ Q_{i-1/2} + (1+\kappa)D^- Q_{i+1/2}] \quad (8)$$

$$Q_{i+1/2}^R = Q_{i+1} - \frac{1}{4}[(1-\kappa)D^- Q_{i+3/2} + (1+\kappa)D^+ Q_{i+1/2}]$$

여기서 유량제한 값(flux-limited value) DQ 와 minmod 함수는

$$D^+ Q_{i-1/2} = \text{minmod}(\delta Q_{i-1/2}, b\delta Q_{i+1/2}),$$

$$D^- Q_{i+1/2} = \text{minmod}(\delta Q_{i+1/2}, b\delta Q_{i-1/2}),$$

$$\delta Q_{i+1/2} = Q_{i+1} - Q_i,$$

$$\text{minmod}(x,y) = \text{sign}(x)\max[0, \min|x|, y \text{ sign}(x)]$$

이고, 선형결합 변수 κ 의 범위는 $-1 \leq \kappa \leq 1$ 이다. κ 가 1/3 일 때 식 (8)은 3차 정확도를 갖고[21], 유량구배 제한자 b 의 범위는 $1 \leq b \leq (3-\kappa)/(1-\kappa)$ 이다. 본 논문에서는 2차 정확도에서 $\kappa = -1$, $b = 2$ 로, 3차 정확도에서는 $\kappa = 1/3$, $b = 4$ 로 하여 계산하였다.

한편, 기초방정식 (3)의 시간적분은 다음과 같은 4단계 Runge-Kutta법[20]을 이용하여 비정상해의 정확도를 높였다.

$$Q^{(1)} = Q^n - \frac{1}{4} \Delta t L(Q^n),$$

$$Q^{(2)} = Q^n - \frac{1}{3} \Delta t L(Q^{(1)}),$$

$$Q^{(3)} = Q^n - \frac{1}{2} \Delta t L(Q^{(2)}),$$

$$Q^{n+1} = Q^n - \Delta t L(Q^{(3)}) \quad (9)$$

단, 차분 연산자 $L(Q) = \partial E / \partial x$ 이다.

4. 계산결과 및 고찰

이 연구에서는 Euler방정식에 대한 Riemann문제로서 Sod가 제안한 표준문제[22]를 통하여 진보[16]에서 검증한 본 기-액 2상 매체 기초방정식의 고해상도 차분해법을 가지고, 기-액 2상 매체중의 고속유동에 대한 압력과 특성을 조사하기 위하여, 일정한 양의 void를 갖는 기-액 2상 매체의 충격파관 문제를 해석하였다.

이 문제의 해석 구간은 Reference[22]에서와 같이 $-10m \leq x \leq 10m$ 이며 물리량의 초기치는 불연속면 ($x = 0m$)의 좌우 각각에 대하여 다음과 같다.

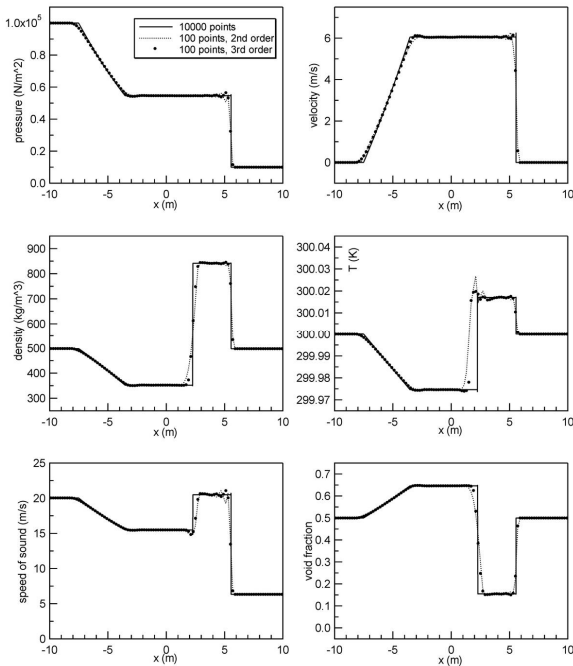


Fig. 3 Computational results of pressure, density, velocity, temperature, speed of sound and void fraction distribution for gas-liquid 2-phase media at $\alpha_i = 50\%$, time $t=0.375s$

$$p_L = 0.1 \text{ MPa}, u_L = 0 \text{ m/s}, T_L = 300 \text{ K}, \alpha_L = \alpha_i$$

$$p_R = 0.01 \text{ MPa}, u_R = 0 \text{ m/s}, T_R = 300 \text{ K}, \alpha_R = \alpha_i \quad (10)$$

Fig. 1에 초기 void율 $\alpha = 100\%$ 의 이상기체 (비열비 $\gamma = 1.4$)에 대한 $t = 0.01s$ 에서의 계산 결과와 엄밀해[23]와의 비교를 나타낸다. CFL수는 대략 0.3이다. 10000점의 결과는 엄밀해와 일치하며, 격자수 100점의 경우도 불연속면의 산일을 제외하면 좋은 정확도를 보이고 있다. 그림에서 기호 (·) 표시는 3차 정확도의 MUSCL TVD법에 의한 계산결과로 실제 격자점에서의 계산 값들을 나타낸다. 2차, 3차 정확도에 의한 결과 모두 수치적 진동이 없는 단조한 해를 보이고 있으나 같은 격자점을 이용한 계산이라도 3차의 경우가 엄밀해에 더 가깝다.

Fig. 2에 초기 void율 $\alpha_i = 80\%, 50\%, 20\%$ 인 기-액 2상 매체에 대한 결과를 보인다. 압력파의 거동은 전보의 등온 과정을 가정한 경우와 거의 같으나 본 연구에서는 에너지 보존식을 풀고 있기 때문에 압축된 매체의 온도가 각각의 void의 변화와 반대로, 즉 void에 대한 비열에 따라 상승하고 팽창에 의해 내려가고 있음을 볼 수 있다. 그러나 온도변화 이

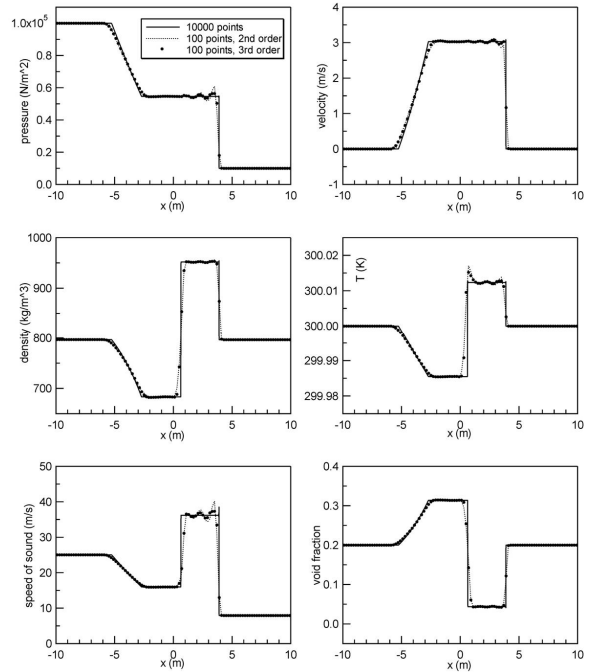


Fig. 4 Computational results of pressure, density, velocity, temperature, speed of sound and void fraction distribution for gas-liquid 2-phase media at $\alpha_i = 20\%$, time $t=0.21s$

외의 유동현상을 보면 등온과정으로 가정한 경우의 결과와 그다지 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이것은 void율 80% ~ 20%사이의 중간 정도의 void를 갖는 기-액 매체는 기체에 비하여 비열이 커 온도변화가 작기 때문이다. 따라서 고압이 되는 경우를 제외하면 중간 정도의 void를 갖는 기-액 매체의 거동은 등온과정으로 가정하에서도 거의 재현할 수 있다. 그러나 void율이 100%인 완전 기체의 경우에는 (Fig. 1) 온도변화가 크고 그 온도차에 의해 접촉 불연속면이 생기고 있음을 알 수 있다. 등온과정으로 가정한 경우에는 이와 같은 접촉 불연속면이 존재하지 않음을 전보에서 논의하였다. 또, Fig. 4와 같이 void율이 작은 경우, 충격파 배후에 수치적인 진동이 있음을 볼 수 있다. 이것은 MUSCL TVD법으로 정확도를 높일 때 생긴 것으로, 식 (8)에서 보존변수 Q로 내삽한데 따른 불균형으로부터 생긴 흔들림으로 생각된다. 이 원인은 Quirk and Karni[24]의 견해도와 같은 것으로, 기-액 2상 매체의 기초방정식을 보존계 해법으로 풀기 때문으로 생각된다. Karni[25]에 의하면 접촉 불연속면을 끼고 일정 압력으로 온도 및 에너지가 단조롭게 변화하는 상황을 보존해법으로 다루면, 접촉면 부근에서는 수치적으로 확실한 해로부터 압력을 도출하는 것이 되므로 압력장의 균형이 일그러져 수치적

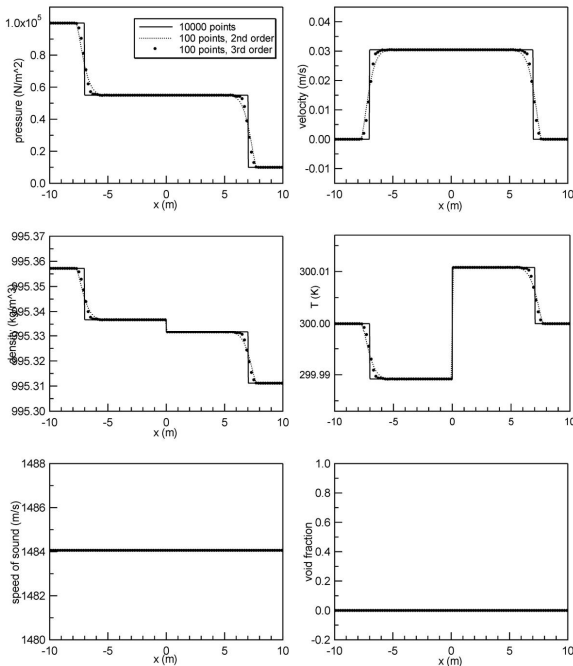


Fig. 5 Computational results of pressure, density, velocity, temperature, speed of sound and void fraction distribution for liquid phase ($\alpha_i = 0\%$) at time $t=0.00473s$

동이 일어날 수 있다고 보고하고 있다. 또, $\alpha = 80\% \sim 20\%$ 에서는 온도변화자체가 미미하기는 하지만 밀도의 도약이 심한 곳에서 다소간의 오버슈팅을 나타내고 있다.

Fig. 5는 초기 void를 $\alpha_i = 0\%$ 인 액체의 충격파관 문제에 대한 계산결과를 나타낸다. 오른쪽으로 충격파, 왼쪽에 팽창파가 전파하고 이에 동반하여 액체의 온도도 근소하긴 하지만 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 전보의 결과와 달리 접촉 불연속면이 존재하고 매우 늦은 속도로 우측으로 이동하고 있다. 한편, 이들의 계산으로부터(Fig. 1-5) 식 (2) 또는 식 (6)에서 구한 음속이, Reference[10]에서 검토된 바와 같이, void의 존재에 따라 단상류로부터 멀어질수록 정량적으로 급속히 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 캐비테이션 유동을 해석하기 위하여 제안된 기-액 2상 균질모델을 에너지 식이 포함된 기초방정식에 도입하고, 고해상도 수치해법을 적용하여 일정한 양의 void를 갖는 기-액 2상 매체중의 충격파관 문제를 해석하였다. 그 결과 기-액 2상 국소균질모델을 기초로 하여 구성된 기초방정식의

Jacobi행렬이 해석적으로 대각화 됨을 보이고, 대각행렬의 고유치로부터 구한 음속이 열역학적 관계로부터 유도한 음속과 동일함을 확인하였다. 해석적인 대각화를 행함으로써 기-액 2상 매체의 기초방정식에 고해상도 수치해법을 적용할 수 있음을 보였고, 기체상에서 액체상에 이르기까지 넓은 범위의 void율에 대하여 기-액 2상 매체중의 파동현상을 높은 정확도로 안정하게 포획할 수 있음을 보였다. 또한, void를 포함하는 혼상유동에 대해서는 기체에 비하여 비열이 커 온도변화가 작기 때문에 등온과정을 가정한 경우와 거의 같은 결과를 보였다. 그러나 단상류인 기체에 대해서는 온도변화가 크고 그 온도차에 의해 등온과정과는 달리 접촉 불연속면이 생긴다. 액체에 대해서도 온도변화는 미미하나 등온과정에서는 볼 수 없던 접촉 불연속면이 존재한다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부재원 한국연구재단의 지원을 받은 일반연구지원사업(NRF-2011-0023729)과 다중현상 CFD 연구센터의 과제 (No.2009-0083510)로 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- [1] 2000, Gopalan, S. and Katz, J., "Flow Structure and modeling Issues in the Closure Region of Attached Cavitation," *Phys. of Fluids*, Vol.12, No.4, pp.895-911.
- [2] 1994, Chen, Y. and Heister, S.D., "A Numerical Treatment for Attached Cavitation," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.116, No.3, pp.613-618.
- [3] 1998, Grogger, H.A. and Alajbegovic, A., "Calculation of Cavitating Flows in Venturi Geometries Using Two Fluid Model," *ASME FEDSM 98-5295*, Washington D.C.
- [4] 1998, Shin, B.R. and Ikhagi, T., "A Numerical Study of Unsteady Cavitating Flows," *Proc., 3rd Int., Sympo. on Cavitation*, Vol.2, pp.301-306.
- [5] 2000, Ventikos, Y. and Tzabiras, G., "A Numerical Method for the Simulation of Steady and Unsteady Cavitating Flows," *Computers & Fluids*, Vol.29, No.1, pp.63-88.
- [6] 1998, Merkle, C.L., Feng, J.Z. and Buelow, P.E.O., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," *Proc., 3rd Int., Sympo. on Cavitation*, Vol.2, pp.307-311.
- [7] 2000, Kunz, R.F., Boger, D.A. and Stinebring, D.R.,

- "Modeling Hydrodynamic Nonequilibrium in Cavitating Flows," *Computers & Fluids*, Vol.29, No.8, pp.849-875.
- [8] 1996, Chen Y. and Heister, S.D., "A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.118, No.1, pp.172-178.
- [9] 2001, Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H. and Jiang, Yu., "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *ASME FED SM-2001*, New Orleans, Louisiana.
- [10] 2003, Shin, B.R., Iwata, Y. and Ikohagi, T., "A Numerical Study of Unsteady Cavitating Flows Using a Homogenous Equilibrium Model," *Computational Mechanics*, Vol.30, No.5, pp.388-395.
- [11] 2003, Iga, Y., Nohmi, M., Goto, A., Shin, B.R. and Ikohagi, T., "Numerical Study of Sheet Cavitation Break-off Phenomenon on a Cascade Hydrofoil," *ASME J. Fluid Engng.*, Vol.125, No.4, pp.2002-2010.
- [12] 2004, Shin, B.R., Yamamoto, S. and Yuan, X., "Application of Preconditioning Method to Gas-Liquid Two-Phase Flow Computations," *ASME J. Fluid Engng.*, Vol.126, No.4, pp.605-612.
- [13] 2004, Yamamoto, S. and Shin, B.R., "A Numerical Method for Natural Convection and Heat Conduction around and in a Horizontal Circular Pipe," *Int'l J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.47-12, pp.5781-5792.
- [14] 2008, Seo, J.H., Moon, Y.J. and Shin, B.R., "Prediction of Cavitating Flow Noise by Direct Numerical Simulation," *J. Comput. Phys.*, Vol.227, No.13, pp.6511-6531.
- [15] 2010, Dittakavi, N., Chunekar, A. and Frankel, S., "Large Eddy Simulation of Turbulent-Cavitation Interactions in a Venturi Nozzle," *ASME J. Fluid Engng.*, Vol.132, No.12, pp.121301-1-11.
- [16] 2007, Shin, B.R., "Gas-Liquid Two-Phase Homogeneous Model for Cavitating Flow," *J. of Comput. Fluids Eng.*, Vol.12, No.2, pp.53-62.
- [17] 1971, Chen, H.T. and Collins, R., "Shock Wave Propagation Past on Ocean Surface," *J. Comput. Phys.*, Vol.7, pp.89-101.
- [18] 1979, van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme V. A Second-Order Sequel to Godunov's Method," *J. Comput. Phys.*, Vol.32, pp.101-136.
- [19] 1981, Roe, P.L., "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Scheme," *J. Comp. Phys.*, Vol.43, pp.357-372.
- [20] 1981, Jameson, A., Schmidt, W. and Turkel, E., "Numerical Simulation of the Euler Equations by Finite Volume Method Using Runge-Kutta Stepping Schemes," *AIAA paper 81-1259*.
- [21] 2003, Shin, B.R., "A Stable Numerical Method Applying a TVD Scheme for Incompressible Flow," *AIAA J.*, Vol.41, No.1, pp.49-55.
- [22] 1998, Laney, C.B., *Computational Gasdynamics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [23] 1984, John, J.E.A., *Gas Dynamics*, Allyn and Bacon, Inc., Boston.
- [24] 1996, Quirk, J.J. and Karni, S., "On the Dynamics of a Shock-Bubble Interaction," *J. Fluid Mech.*, Vol.318, pp.129-163.
- [25] 1994, Karni, S., "Multicomponent Flow Calculations by a Consistent Primitive Algorithm," *J. Comput. Phys.*, Vol.112, pp.31-43.