

서로 다른 두 개의 공동모델의 모델 상수값이 공동의 길이에 미치는 영향연구

김 미 선,¹ 하 콩 투,¹ 박 원 규,^{*1} 정 철 민²

¹부산대학교 기계공학부

²국방과학연구소 6기술연구본부 2부

A STUDY ABOUT THE EFFECT OF MODEL CONSTANTS OF TWO CAVITATION MODELS ON CAVITY LENGTH

M. S. Jin,¹ C. T. Ha,¹ W. G. Park^{*1} and C. M. Jung²

¹School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

²Naval Systems R&D Institute Division 2, Agency for Defense Development

This work was devoted to compare two different cavitation models to study the dependency of model constants. The cavitation model of Merkle et al.(2006) and Kunz et al.(2000) were used for the present computational study. The cavitation models were coupled with the incompressible unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes solver to indicate the vaporization and condensation processes. For this purpose, a preconditioning method was added as the pseudo-time term to solve the unsteady stiffness problems. For the validation of the numerical simulation, the computation was performed for the cavitating flow in a converging-diverging channel. The present results show that Merkle's cavitation model is independent to the model constants, and the higher numerical accuracy over Kunz's cavitation model.

Key Words : 공동현상(Cavitation), 공동모델(Cavitation Model), 수축-확대채널(Converging-Diverging Channel), 균일혼상류모델(Homogeneous Mixture Model), 내비어-스톡스 방정식(Navier-Stokes Equations)

1. 서 론

공동(cavity)현상은 국부적인 지점에서 유체압력이 포화증기압이하로 떨어지면서 액체가 기화되는 현상이다. 액체를 작동유체로 하는 노즐, 프로펠러, 터빈, 인젝터, 펌프, 어뢰 등 다양한 수력학적 시스템에서 국부적으로 유속이 빨라지면서 압력이 낮아지다가 포화증기압 이하로 떨어지면 기포가 생기기 시작하고 압력이 포화증기압 이하를 유지하면 기포가 성장하여 공동이 발생한다. 역으로 기포가 생성된 지역에서 유

체의 압력이 포화증기압보다 높아지면 공동이 급격히 축소하여 소멸되고 동시에 높아진 압력영역에서 액체는 물체표면에 충격을 가하여 소음과 진동 및 마모 현상을 야기한다.

공동유동을 해석하기 위하여 전산유체분야에서는 질량보존법칙, 운동량보존법칙, 에너지보존법칙을 기초로 한 다상 유동 지배방정식을 제시하여 유체의 거동을 계산하였다. Reboud와 Delandoy[1]는 기상과 액상이 공존하는 상태를 단일연속방정식으로 표현하였다. 하지만 이 경우는 응축기체와 비응축기체를 정확히 구별하여 해석하는 것이 어렵다. Staedkte, Deconinck와 Romenski[2]는 연속방정식과 운동량방정식을 액상과 기상에 대해 분리하여 해석하였다. 하지만 이 경우는 기상과 액상의 경계면에서 항상 동역학적 평형을 유지한다고 가정하므로 공동의 표면에서 압력과 속도의 변화를 무시하게 된다. 그러므로 이 방법은 원자력연구 분야에서 많이 사용되고 있다. Merkle, Feng와 Buelow[3], 그리고 Kunz 등[4]은 다상

Received: February 6, 2012, Revised: August 6, 2012,

Accepted: August 7, 2012.

* Corresponding author, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.3.025>

© KSCFE 2012

유동에 대한 보다 효율적인 해석을 위해 균일 혼상류 모델(homogeneous mixture model)을 제시하였다. 이 경우는 기상과 액상의 경계면에서 항상 동역학적 평형과 열역학적 평형이 유지된다고 가정하였고 이를 바탕으로 액상과 기상에 대해서 연속방정식은 분리하여 해석하고, 질량유량을 소스 항으로 추가하였으며, 운동량방정식은 혼상류(mixture)방정식으로 표현하였다.

균일 혼상류 모델(homogeneous mixture model)에서 공동현상을 예측하기 위해 액상이 기상으로 전달되는 광과 기상이 다시 액상으로 전달되는 량에 대한 정확한 물리적인 해석이 필요한데, Kunz 등[4]이 이러한 조건을 만족하는 공동모델을 제시하였다. 현재 국외의 여러 연구팀들에서 Kunz 모델을 사용 중에 있다[4-6]. 이 모델에서 액상이 기화되는 량은 국부지역의 압력과 증기압의 차이와 액상 체적분율에 비례한다. 반면에 기상이 다시 응축되는 량은 오직 액상 체적분율에 의해 결정된다. 하지만 여러 연구에서 Kunz 모델은 유동장이 달라짐에 따라서 모델방정식의 수식화 상수를 달리 사용하고 있다. 이것은 특정된 유동장에 대해서 특정된 모델 상수 값을 취하지 않으면 정확한 수치해를 얻을 수 없음을 의미한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Merkle, Li와 Sankaran[7]은 모델 상수 값에 대한 의존성을 낮추어 주는 새로운 공동모델을 개발하였고, Ha 등[8-10]과 김승운, 박원규 및 정철민[11]의 연구에서 수식 진개의 틀린 부분을 바로잡고 성공적으로 검증하였다. Merkle 모델에서 액상이 기화되는 량과 기상이 다시 액화되는 량은 모두 국부지역의 압력과 액상 체적분율에 의존한다.

본 논문에서는 Merkle, Li와 Sankaran[7]이 새로 개발한 공동모델의 특성에서 모델 상수 값에 대한 의존성을 검증하기 위해 여러 개의 모델 상수 값들을 취하여 공동유동 과정을 각각 계산함으로써 상수 값의 크기가 공동의 생성과 소멸되는 과정에 미치는 영향을 분석하였다. 한편, 기존에 타 논문에서 많이 검증되고 있는 Kunz 모델[4]을 적용하여 Merkle 모델[7]과 같은 해석과정을 병행하므로 공동유동 과정에서 두 가지 모델이 갖고 있는 특성을 각각 보여주고자 한다.

2. 수치적 모델

2.1 지배방정식

본 연구에서는 2상 유동에서 기상과 액상의 경계면에서 열역학적 평형과 동역학적 평형이 유지된다고 가정하고 균일 혼상류 모델(homogeneous mixture model)을 이용하여 비압축성 공동유동 과정을 해석하였다. 기상과 액상에 대한 질량 보존 방정식은 독립적으로, 운동량 방정식은 혼상류(mixture)방정식으로 서술하였고 기상과 액상의 상호 질량 전달과정은 소스

항(source term)을 추가하여 해석하였다.

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_v u_j)}{\partial x_j} = -(\dot{m}^+ + \dot{m}^-) / \rho_v \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_l u_j)}{\partial x_j} = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) / \rho_l \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m u_i u_j) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{m,t} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 하첨자 l, v , 그리고 m 은 각각 액상, 기상 및 혼상(mixture)을 의미한다. p, u, ρ, α, μ 는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며, t 는 물리적 시간을 의미한다. 그리고 혼상류에서 체적분율, 밀도 및 점성계수에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_l + \alpha_v &= 1.0 \\ \rho_m &= \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v \\ \mu_m &= \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v \end{aligned} \quad (4)$$

기존의 지배방정식을 기반으로 Owis와 Nayfeh[12]이 제시한 예조건화(pre-conditioning)기법을 적용하여 계산과정에서 안정성을 높여주었다. 방정식에서 τ 는 의사시간(pseudo-time) 항을 나타내고, 예조건화 된 지배방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_v}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial(\alpha_v p)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\alpha_v u_j)}{\partial x_j} \\ = -(\dot{m}^+ + \dot{m}^-) / \rho_v \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_l}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial(\alpha_l p)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\alpha_l u_j)}{\partial x_j} \\ = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) / \rho_l \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m u_i u_j) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{m,t} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 β 는 예조건화 상수이다.

식 (5)과 식 (6)을 통해 혼상류 체적 연속방정식을 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial(u_j)}{\partial x_j} = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right) \quad (8)$$

2.2 공동모델

2상 유동 해석에서 기상과 액상의 물질전달(mass transfer) 과정에 액상이 기상으로 전달되는 양을 \dot{m}^- 로 표현하였고 역으로 기상이 액상으로 전달되는 양을 \dot{m}^+ 로 표현하였다.

본 논문에서는 두 가지 공동모델을 적용하였다. 하나는 Merkle 등이 2006년에 새롭게 제안한 모델[7]로서 모델-I으로 칭하였고, 다른 하나는 타 논문에서 광범위하게 적용되고 있는 모델로서 Kunz 등[4]에 의하여 2000년에 제안되었으며 여기서 모델-II로 칭하였다.

두 가지 공동모델의 수학적 표현을 분석하면 액상과 기상의 상변화율은 모두 체적분율, 국부압력 및 공동모델의 모델 상수값에 의존하게 된다.

모델-I은 램핑 함수를 사용하여 국부압력을 기준으로 기화와 액화되는 과정을 따로 표현하였다. 이것은 수치적 계산 과정에서 국부압력과 공동이 생성되고 소멸되는 과정을 적절히 제어하여 계산의 안정성을 높여줌을 확인할 수 있다. 반대로 모델-II는 물이 기화되는 과정만 램핑 함수를 사용하여 국부압력과 포화압력의 관계를 적절히 제어하였다. 하지만 수학적 모델에 의하면 기포가 존재하는 영역에서 응축과정은 항상 기화과정과 동반되어 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 응축 계수가 허용범위 이상의 값을 취하면 압력은 포화증기압 이하로 떨어지고 공동은 길이가 줄어들거나 생성되지 않는 비물리적인 결과를 초래할 수 있다. 그러므로 두 가지 공동모델에서 모델 상수값은 공동의 생성율에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 하지만 실제로 공동모델이 모델 상수값에 대한 의존성은 계산을 통해서 확인할 것이고 다음 장에서 보여주고 있다.

모델 - I (Merkle, Li와 Sankaran Ref[7])

$$\dot{m}^- = -k_v \frac{\rho_v \alpha_1}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left(\frac{(p_v - p)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\}$$

$$\dot{m}^+ = k_l \frac{\rho_l \alpha_v}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left(\frac{(p - p_v)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\}$$

여기서 t_∞ 는 특성유동시간(characteristic flow time)이고, k_v 는 증발계수(evaporation coefficient)이며, k_l 은 응축계수(condensation coefficient)이다. k_p 는 수치적 안정성을 지배하는 요소로서 공동모델에 미치는 영향을 무시할 수 있는 정도의 작은 값을 취하였다. 본 연구에서는 기준값으로 $k_v=100.0$ 과 $k_l/k_1=10.0$ 을 사용하였다.

모델 - II (Kunz 등 Ref[4])

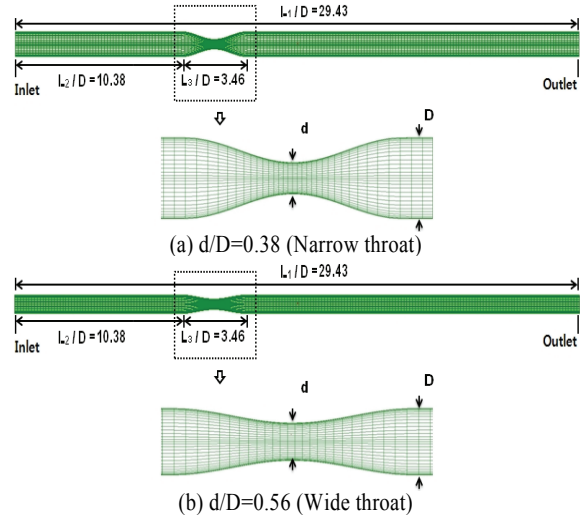


Fig. 1 Configuration of converging-diverging channels and computational grids

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_v \alpha_1 \min [0, p - p_v]}{(\rho_1 U_\infty^2 / 2) t_\infty}$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_l \alpha_1^2 (1 - \alpha_1)}{t_\infty}$$

여기서 t_∞ 는 특성유동시간이고, C_{dest} 는 증발계수(evaporation coefficient)이며, C_{prod} 는 응축계수(condensation coefficient)이다. 기준값으로 $C_{dest}=1000.0$ 과 $C_{dest}/C_{prod}=100.0$ 을 사용하였다.

3. 결과 및 검토

공동모델의 모델상수 값에 대한 의존성을 검증하기 위해 본 연구에서는 3차원 수축-확대 채널내부의 유동을 연구하였으며, 모델의 격자구조는 Fig. 1에서 보여주고 있다. Fig. 1(a) 단면은 목(throat)의 높이 대 출구의 높이의 비가 0.38인 좁은 목(narrow throat) 채널이고 Fig. 1(b) 단면은 목(throat)의 높이 대 출구의 높이의 비가 0.56인 넓은 목(wide throat) 채널이다. 그리고 이 두 경우에 채널 입구에서 출구까지 길이(L_1) 대 출구 높이의 비는 모두 29.43이다.

Fig. 1에서 수축-확대 채널 내부의 유동을 해석하기 위하여 유동의 초기조건과 경계조건을 설정하였다. 초기조건은 채널 내부에서 압력분포는 일정($p = p_\infty$)하고 유속은 영이라고 가정하였다. 경계조건에서 채널 벽면은 점착(no-slip)조건을 적용하였고 벽면의 수직방향에 따른 압력분포는 $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ 을 적용

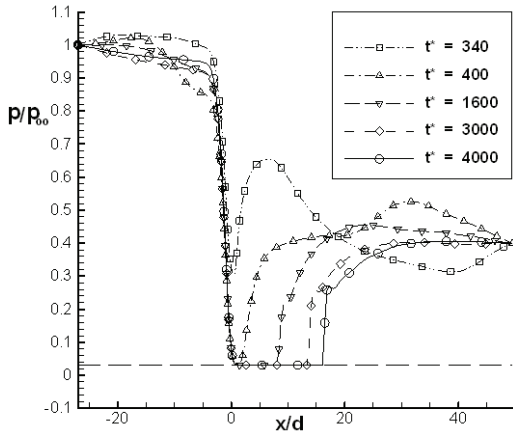


Fig. 2 Time evolution of the streamwise pressure distribution ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4$, $d/D = 0.38$)

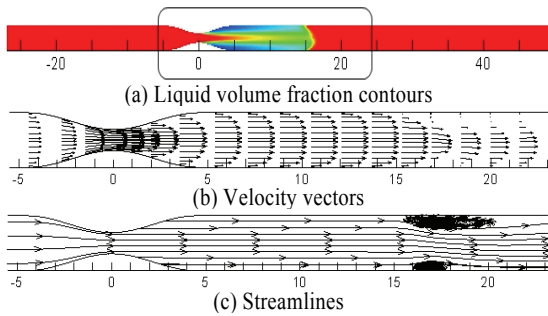


Fig. 3 Flow features in converging-diverging channel ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4$, $d/D = 0.38$)

하였다. 한편, 채널 입구에서 압력의 크기를 $p_{inlet}/p_{\infty} = 1.0$ 으로 고정(fixed)하고 출구압력을 갑자기 지정된 값 $p_{exit}/p_{\infty} = 0.4$, 0.3으로 떨어뜨려 채널 내부에서 유동이 야기(inducing) 되도록 하였으며 계산을 유량이 정상상태에 이를 때까지 계속 하였다.

첫 번째 수치 시험으로 Fig. 1(a)의 좁은(narrow) 목(throat) 을 가지는 채널에 대한 계산을 수행하였고, 결과는 Fig. 2-8에서 보여주고 있다. 여기서 출구압력은 $p_{exit}/p_{\infty} = 0.4$ 를 취하였다. Fig. 2-3는 모델-I을 적용한 연구결과이며 모델상수는 기준값을 사용하고 있다. Fig. 2는 무차원 시간($t^* = tU_{\infty}/L$)에 따른 유동(streamwise)방향의 압력분포이다. 그림에서 압력은 유동방향에 따라 채널 목(throat)에서 급격히 감소하다가 다시 급증하는 현상을 보여주고 있다. 이러한 현상은 $t^* = 400$ 을 지나면서 목에서부터 국부압력이 증기압으로 떨어지고, 이때 부터 공동이 생성되기 시작하며 시간이 지나면서 공동의 길이는 서서히 증가하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2

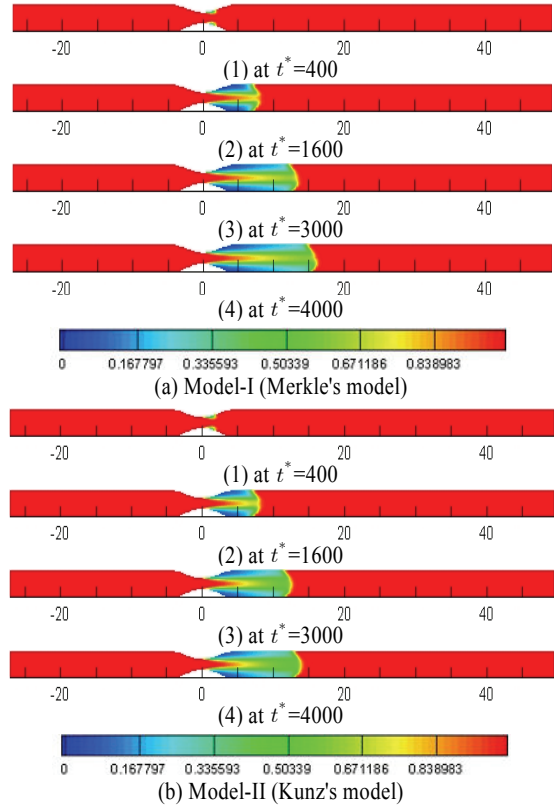


Fig. 4 Time evolution of the liquid volume fraction contours ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4$, $d/D = 0.38$)

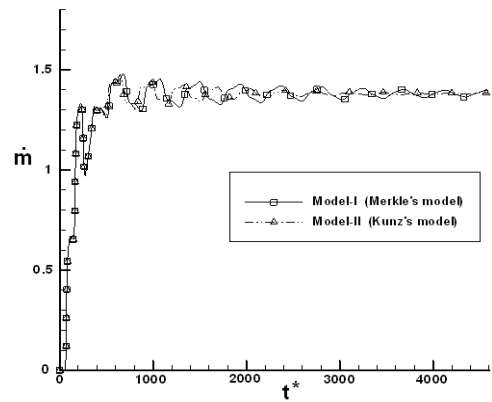


Fig. 5 Mass flow rate in the narrow throat ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4$, $d/D = 0.38$)

와 같은 조건에서 유동이 정상상태가 되었을 때 채널내부의 액체 체적분율과 국부지역의 속도벡터 및 유선분포를 보여주고 있다. 공동이 생성된 영역에서 유체의 속도는 급격히 증가하다가 공동이 사라지면서 감소하며, Fig. 2에서 보여주듯이

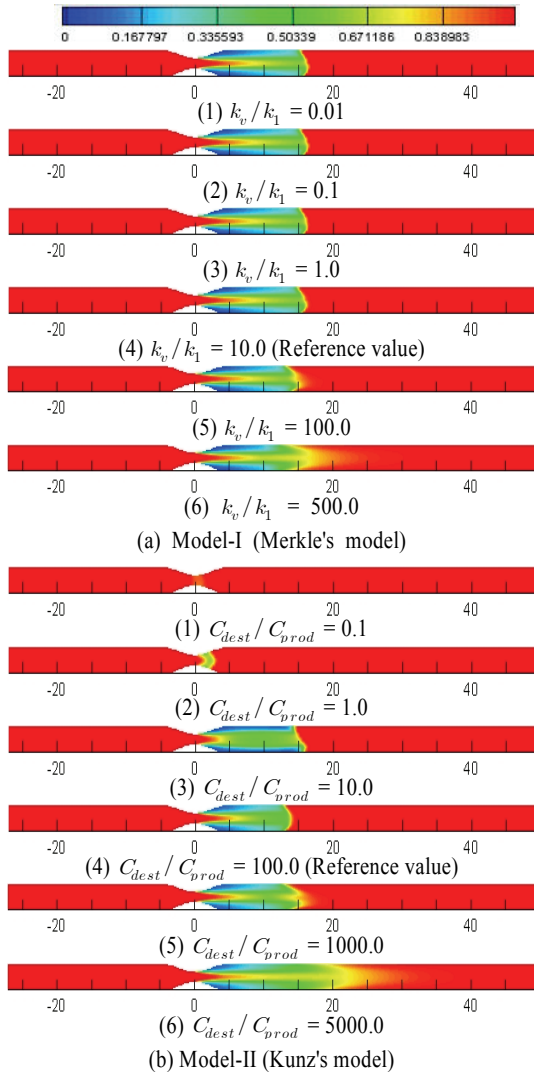


Fig. 6 Comparison of liquid volume fraction contour with two models by varying model constants ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4, d/D = 0.38$)

이러한 현상은 극심한 압력 차이를 초래하여 와류가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 두 가지 모델에서 상수값을 기준값으로 사용하였을 때 비정상상태 공동유동과정에서 시간이 지남에 따라 공동의 길이가 정상상태의 길이로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 모델-I과 모델-II에서 공동은 목에서 생성되기 시작하여, 시간이 지날수록 공동의 길이는 증가하며 같은 시각에 대해 공동의 길이는 비교적 서로 일치함을 보여주고 있다. 한편 Fig. 4의 두 가지 모델에 대해서 시간의 흐름에 따른 채널 목의 질량유량은 Fig. 5에서 보여주고 있고, Merkle 모델을 사용

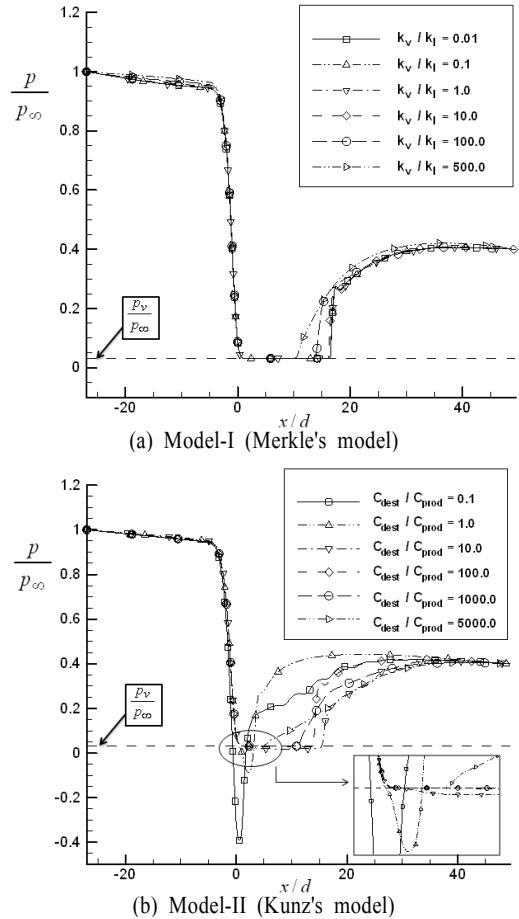
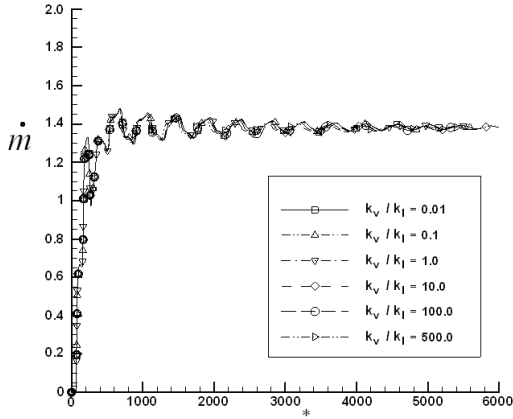


Fig. 7 Comparison of streamwise pressure distribution with two models by varying model constants ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4, d/D = 0.38$)

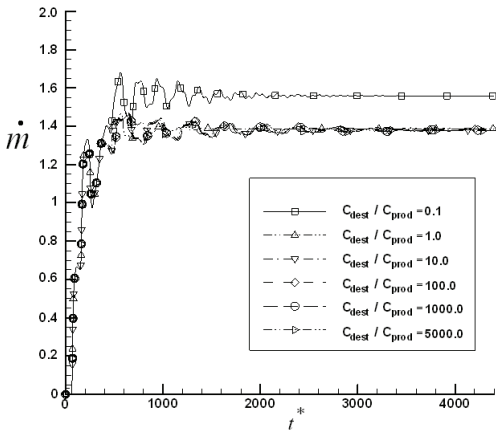
하였을 때와 Kunz 모델을 사용하였을 때 질량유량은 서로 일치함을 보여주고 있다. 그림에서 질량유량은 시간의 흐름에 따라 서서히 안정화 되면서 정상 상태로 근접해 가고 있다.

다음으로 모델상수에 대한 의존성을 연구하기 위해 모델-I과 모델-II에서 증발계수 대 응축계수의 비를 각각 기준값의 0.1배씩 줄이거나 10.0배, 50.0배로 증가시키면서, 그 값들이 정상상태가 될 때까지 계산을 반복하였다. 사용한 계수비는 각각 $k_v/k_1 = 0.01, 0.1, 1.0, C_{dest}/C_{prod} = 0.1, 1.0, 10.0$ 과 $k_v/k_1 = 100.0, 500.0, C_{dest}/C_{prod} = 1000.0, 5000.0$ 이고 계산 결과는 Fig. 6-8에서 보여주고 있다.

Fig. 6은 여러 가지 모델 상수 값들을 사용하였을 때 해당되는 공동의 길이를 비교한 그림이다. Merkle 모델을 사용하는 Fig. 6(a)에서 공동의 길이는 계수비에 관계없이 비교적 일치한 크기를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 Kunz



(a) Model-I (Merkle's model)



(b) Model-II (Kunz's model)

Fig. 8 Comparison of mass flux with two models by varying model constants ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.4, d/D = 0.38$)

모델을 사용하는 Fig. 6(b)에서 공동의 길이는 계수비가 감소하면서 공동의 길이가 줄어들다가 계수비가 10.0일 때 일시적으로 증가하지만 다시 감소하는 추세를 보여주고 있으며 계수비가 0.1일 때 공동 현상이 전혀 발생하지 않는 등 공동의 길이가 모델상수에 상당히 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에 해당되는 유동(streamwise)방향의 압력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 마찬가지로 Fig. 7(a)에서 공동의 길이는 계수비에 관계없이 비교적 일치함을 보여주고 있다. 반면에 Fig. 7(b)는 계수비가 감소하면서 공동의 길이는 증가하고 있고, 계수비가 기준치 이하로 줄어들면 국부지역의 압력이 증기압 이하로 떨어지면서 비물리적인 현상이 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 공동유동에서 시간에 대한 채널 목의 질량유량을 보여주고 있다. Merkle 모델을 사용하는 Fig. 8(a)를 Fig. 6(a)와 비교하면 공동이 생성될 때 질량유량은 항상 일치하다는

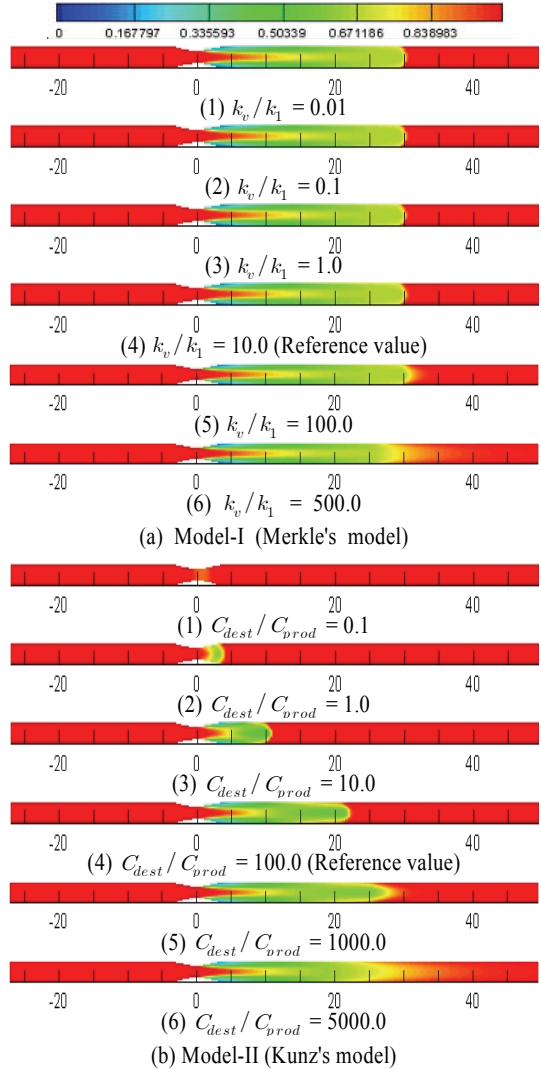


Fig. 9 Comparison of liquid volume fraction contour with two models by varying model constants ($p_{exit}/p_{\infty} = 0.3, d/D = 0.56$)

것을 확인할 수 있다. 하지만 Kunz 모델을 사용하는 Fig. 8(b)를 Fig. 6(b)와 비교하였을 때 계수비가 0.1이면 공동은 발생하지 않고 질량유량은 공동발생유량보다 증가하는 비물리적인 현상을 볼 수 있다.

본 연구결과의 재연성을 확인하기 위해 Fig. 1(b)의 넓은(wide) 목(throat)을 가지는 채널에 대해 계산을 수행하였으며 결과는 Fig. 9-11에서 보여주고 있다. 여기서 출구압력은 $p_{exit}/p_{\infty} = 0.3$ 을 취하였고 모델-I과 모델-II에서 증발계수 대응축계수의 비는 앞에서 언급한 바와 같이 각각 기준값의 0.1배씩 줄이거나 10.0배, 50.0배로 증가시키면서, 그 값들이 정

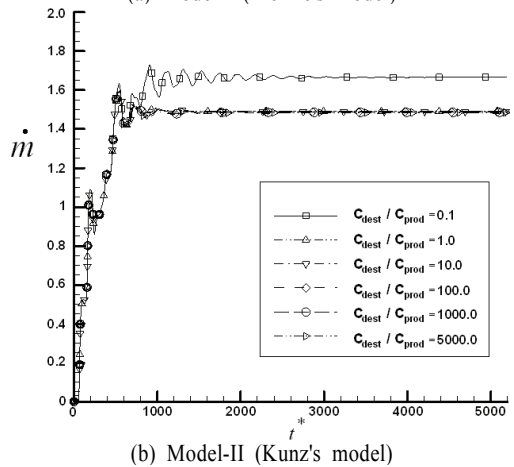
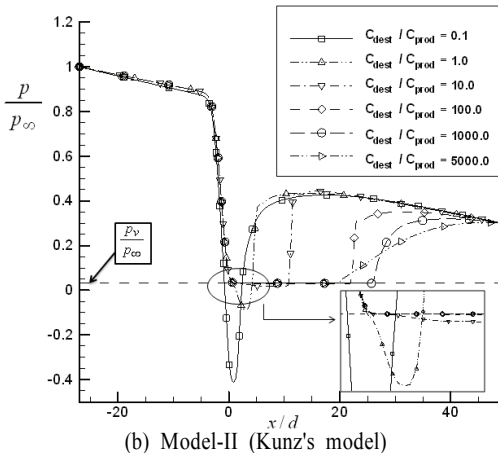
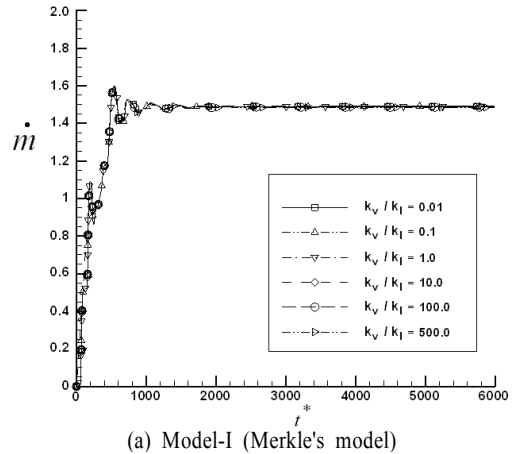
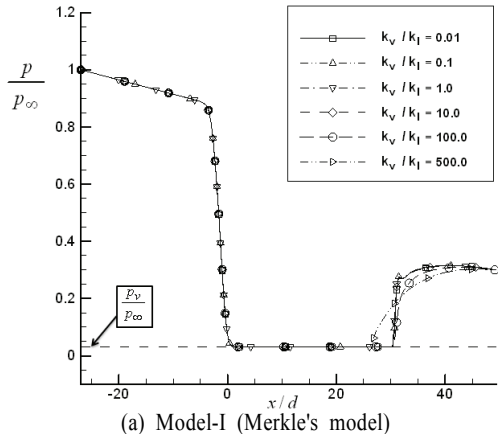


Fig. 10 Comparison of streamwise pressure distribution with two models by varying model constants ($p_{exit}/p_\infty = 0.3, d/D = 0.56$)

Fig. 11 Comparison of mass flux with two models by varying model constants ($p_{exit}/p_\infty = 0.3, d/D = 0.56$)

상상태가 될 때까지 계산을 반복하였다. 사용한 계수비는 각각 $k_v/k_1=0.01, 0.1, 1.0, C_{dest}/C_{prod}=0.1, 0.1, 10.0$ 과 $k_v/k_1=100.0, 500.0, C_{dest}/C_{prod}=1000.0, 5000.0$ 이다. Fig. 9는 여러 가지 모델 상수 값들을 사용하였을 때 해당되는 공동의 길이를 비교한 그림이고, Fig. 10은 그에 대한 유동(streamwise)방향의 압력분포를 보여주며 결과는 Fig. 6-7에서 보았던 현상과 유사하게 나타난다. Merkle 모델을 사용하는 Fig.9(a)-10(a)에서 공동의 길이는 계수비에 관계없이 항상 일치함을 보여주고 있다. 반면에 Kunz 모델을 사용하는 Fig.9(b)에서 공동은 계수비가 감소하면서 길이가 줄어들고 있고, Fig.10(b)에서 계수비가 기준값 이하로 줄어들면 국부지역의 압력이 증기압 이하로 떨어지면서 비물리적인 현상이 발생하는 등 공동유동이 모델상수에 상당히 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 11은 공동유동에서 시간에 대한 채널 목(throat)의 질량유량으로 Fig. 8과 같은 결과를 보여주고 있다. Merkle

모델을 사용하는 Fig. 11(a)에서 공동이 생성될 때 질량유량은 항상 일치함을 볼 수 있고, Kunz 모델을 사용하는 Fig. 11(b)에서 계수비가 0.1이면 공동은 발생하지 않고 질량유량은 공동발생유량보다 증가하는 비물리적인 현상을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 공동모델에 대한 수축-확대채널의 공동유동 해석을 통해 두 모델이 모델 상수 값에 대한 의존성을 검증하였다. 본 연구에서 사용된 두 개의 공동모델은 모두 균일 혼상류 모델로서 Merkle 등이 2006년에 제안한 새로운 모델과 Kunz 모델이다. 모델상수의 의존성 분석을 위한 해석 과정은 공동모델에서 증발계수 대 응축계수의 비를 각각 기준값의 0.1배씩 줄이거나, 10.0배, 50.0배로 증가시키면서 그 값들이 정상상태가 될 때까지 계산을 반복하였다. 따라서

앞에서 토론한 결과 값들을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수축-확대 채널 내부에서 공동은 채널 목(throat)에서 시작되어 시간이 지날수록 길이는 증가하고 유동이 정상 상태가 되면서 일정한 길이를 유지한다는 것을 확인하였다.

2. 새로 제안된 공동 모델(Merkle 모델)은 공동유동 해석과정에서 모델 상수 값에 대해 거의 독립적이었으며 물리적으로 더 정확하다는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] 1994, Reboud, J.L., Delannoy, Y., "Two Phase Flow Modeling of Unsteady Cavitation," *Proceeding of 2nd International Symposium on Cavitation*, Tokyo, Japan, pp.39-44.
- [2] 2005, Staedkte, H., Deconinck, H., Romenski, E., "Advanced Three-Dimensional Two-Phase Flow Simulation Tools for Application Reactor Safety(ASTAR)," *Nuclear Engineering and Design*, 235, pp.379-400.
- [3] 1998, Merkle, C.L., Feng, J.Z., Buelow, P.E.O., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," *Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, April 7-10.
- [4] 1999, Kunz, R.F., Boger, D.A., Stinebring, D.R., Chyczewski, T.S., Gibeling H.J., "Multi-Phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies," *ASME paper FEDSM 99-7364*, Proceedings of third ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference,, San Francisco, California.
- [5] 2001, Inanc, S., Wei, S., "Numerical Simulation of Turbulent Flows with Sheet Cavitation," *CAV, sessionA7.002*.
- [6] 2001, Lindau, J.W, Kunz, R.F., Mulherin, J.M., Dreyer, J.J., Stinebring, D.R., "Fully Coupled, 6-DOF to URANS, Modeling of Cavitating Flows Around A Supercavitating Vehicle," *CAV03-OS-7-019*.
- [7] 2006, Merkle, C.L., Li, D., Sankaran, V., "Multi-Disciplinary Computational Analysis in Propulsion," *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Sacramento, California.
- [8] 2009, Ha, C.T., Park, W.G., Merkle, C.L., "Multiphase Flow Analysis of Cylinder Using A New Cavitation Model," *Proceedings of the 7rd International Symposium on Cavitation*, Michigan, USA.
- [9] 2009, Ha, C.T., Park, S.I., Merkle, W.G., Merkle, C.L., "Evaluation of A New Cavitation Model," *Proceedings of 2009 KSME Joint Fluids Engineering*.
- [10] 2010, Ha, C.T., & Park, W.G., "Application of Strongly Implicit Procedure Solver to solve Partially- and Super-cavitating Flows," *ICCES MM'10*, ICML20100714039.
- [11] 2011, Kim, S.Y., Park, W.G., Jung, C.M., "Numerical Analysis of Cavitating Flow Past Cylinder with Three Different Cavitation Models," *Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Vol.16 No.1, pp. 60-66.
- [12] 2004, Owis, F.M., Nayfeh, A.H., "Numerical Simulation of 3-D Incompressible, Multi-phase Flows over Cavitating Projectiles," *European Journal of Mechanics B/Fluids*, pp.339-351.