

# 반구형 전두부 실린더에서 발생하는 캐비테이션 유동의 압축성 효과에 대한 수치해석 연구

박 선 호,<sup>1</sup> 이 신 형,<sup>\*2</sup> 신 병 록<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국해양대학교 해양공학과

<sup>2</sup>서울대학교 조선해양공학과

<sup>3</sup>창원대학교 기계공학과

## NUMERICAL ANALYSIS OF CAVITATION WITH COMPRESSIBILITY EFFECTS AROUND HEMISPHERICAL HEAD-FORM BODY

S. Park,<sup>1</sup> S.H. Rhee<sup>\*2</sup> and B.R. Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.

<sup>2</sup>Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul Nat'l Univ.

<sup>3</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

*Cavitation on an axi-symmetric hemispherical head-form body was studied using an Reynolds-averaged Navier-Stokes equations solver based on a cell-centered finite volume method. To consider compressibility effects on the vapor phase and cavity interface, a pressure-based compressible flow CFD code was developed. To validate the developed CFD code, cavitating flow around the hemispherical head-form body was simulated using pressure-based incompressible and compressible CFD codes and validated against existing experimental data in the three-way comparison. The cavity shedding behavior, length of re-entrant jet, drag history, and Strouhal number of the hemispherical head-form body were compared between two CFD codes. The results, in this paper, suggested that the computations of cavitating flow with compressibility effects improve the description of cavity dynamics.*

**Key Words :** 공동 현상(Cavitation), 반구형 전두부 실린더(Hemispherical Head-form Body), 압축성 유동(Compressible Flow), 압축성 효과(Compressibility Effects), 공동 진동(Cavity Shedding), 전산유체역학(CFD)

### 1. 서 론

공동현상은 액체의 압력이 증기압 이하로 떨어질 때 액체상이 기체상으로 증발하는 현상으로 일반적으로 액체상은 비압축성 유동으로, 기체상은 압축성 유동 관점에서 다루어진다. 즉, 공동현상을 이해하기 위해서는 비압축성과 압축성 유동이 동시에 고려되어야 한다.

수치적으로 비압축성 유동은 압력기반 방법으로 이산화되어 주된 인자가 압력인 반면 압축성 유동은 밀도기반 방법으로 이산화되어 밀도가 주된 인자로 사용된다. 공동현상 해석

에 있어서 압력기반 방법[1-4]은 기체상을, 밀도기반 방법[5,6]은 액체상을 표현하는데 어려움이 있어 별도의 수치방법이 필요하다. 압력기반 이산화 방법의 기체상에 대한 어려움을 해결하기 위해 압력기반 압축성 유동방법이 개발되었다. Rincon and Elder[7]는 낮은 Mach 수에 대한 압력기반 방법을 제시하였고 아음속과 초음속사이의 천이영역에 이 기법을 적용하여 충격파를 해석하였고, Issa and Javareshkian[8]은 압력기반 방법에 고차의 TVD 스킴을 적용하였다. Darbandi et al.[9]는 압력기반 방법으로 초기 충격파의 해석방법을 개선하기 위해 새로운 선형화 방법을 제시하였다. Javadi et al.[10]은 압력수정 방정식에 새로운 인자를 도입하여 압력과 속도를 계산하는 알고리즘을 제안하였고, Kadioglu and Sussman[11]은 압력기반 압축성 유동방법을 사용하여 수중폭발에 대해 해석하였다.

압축성 효과를 고려한 압력기반 압축성 유동방법은 충격파

Received: July 29, 2013, Revised: October 7, 2013,

Accepted: October 7, 2013.

\* Corresponding author, E-mail: shr@snu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.009>

© KSCFE 2013

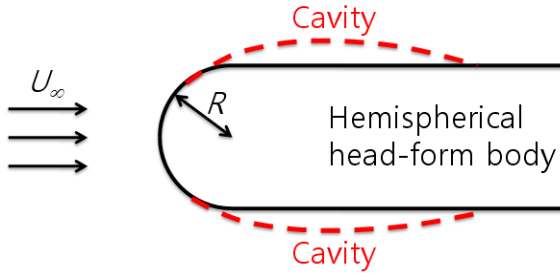


Fig. 1 Problem description of axi-symmetric hemispherical head-form body

[7,8]에 대한 연구를 시작으로 발달하기 시작하였으며, 수중폭발[11]과 공동현상[12,13]과 같은 다상유동에 적용되었다. Venkateswaran et al.[12]은 공동 유동을 해석하기 위해 액체상과 기체상을 동시에 다룰 수 있는 계산 알고리즘을 제시하였고, 공동현상에 대해 압축성과 비압축성 유동 CFD 코드를 각각 사용하여 두 CFD 코드 간에 재돌입 제트(re-entrant jet)가 다른 것을 확인하였다. Goncalves et al.[13]은 압축성과 비압축성 유동 CFD 코드를 이용하여 벤츄리(Venturi)관 내의 공동을 계산하였고, 재돌입 제트로 인해 공동 진동이 다르게 계산된 것을 확인하였다.

본 논문에서는 축대칭 반구형 전두부 실린더(hemispherical head-form body)에서 발생하는 공동에 대해 소스 공개코드인 OpenFOAM을 기반으로 하여 개발된 SNUFOAM-Cavitation[14]을 사용하여 수치해석 연구를 수행하였다. SNUFOAM-Cavitation은 비압축성 유동 CFD 코드와 여러 가지 공동 모델 [1-4]을 포함하고 있다.

본 논문에서는 압력기반 압축성 유동 CFD 코드를 개발하여 반구형 전두부 실린더에서 발생하는 공동현상을 해석하였다. 또한, 비압축성 및 압축성 유동 CFD 코드간의 차이점에 대해 검토하였다.

## 2. 문제 정의

반구형 전두부 실린더는 해양유체분야에서 다양하게 응용되는 형상으로 많은 실험적 수치적 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 반구형 전두부 실린더에서 발생하는 공동현상에 대해 해석하였고 형상은 Fig. 1과 같다. Reynolds 수는 입구 경계조건의 유입류(0.7 m/s)와 반구의 지름(0.2 m)을 기준으로  $1.04 \times 10^6$ 이다. 사용된 캐비테이션 수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_v}{\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2} \quad (1)$$

여기서,  $P_{ref}$ 는 출구경계면에 정의된 압력,  $P_v$ 는 증기압,  $U_\infty$ 는 입구경계면에 정의된 주유동의 속도,  $\rho_l$ 은 액체의 밀도를 나타낸다.

## 3. 계산방법

### 3.1 지배방정식

속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 고려하였고, 난류를 고려하기 위해 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 시간 평균하였고, 난류모델을 고려하였다.

질량보존 방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (3)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $\vec{v}$ 는 속도벡터를 나타낸다.  $\bar{\tau}$ 는 응력 텐서를 나타내고 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v}_m I \right] \quad (4)$$

여기서,  $I$ 는 단위 텐서를 나타낸다. 아래첨자  $m$ 은 혼합류를 의미하고 혼합류에서의 밀도와 점성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \quad (5)$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 체적분율을 나타내고, 아래첨자,  $l$ 과  $v$ 는 액상과 기상을 의미한다.

운동량 보존 방정식을 시간평균하면 다음과 같이 Reynolds 응력항이 나타난다.

$$-\rho_m \overline{v_m v_m} = \mu_t \left[ (\nabla \overline{v_m} + \nabla \overline{v_m}^T) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \nabla \cdot \overline{v_m}) \right] I \quad (7)$$

여기서,  $\mu_t$ 는 난류점성계수를 나타낸다.  $\mu_t$ 는 Boussinesq 가설에 기반을 둔 standard  $k-\epsilon$  난류 모델[15]을 이용하여 계산하였다. 난류 운동 에너지( $k$ )와 난류 소산율( $\epsilon$ )은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m k \vec{v}_m) \\ &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \epsilon \vec{v}_m) \\ &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{3\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $C_\mu, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_\rho, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 는 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3를 사용하였다.  $\mu_t$ 는  $\rho_m C_\mu k^2 / \epsilon$ 로 계산되며, 벽면에는 벽 함수를 적용하였다.

### 3.2 압력 수정 방정식

운동량 보존 방정식은 다음과 같이 이산화 된다.

$$a_P \vec{v}_P + \sum a_N \vec{v}_N = S - \nabla P \quad (10)$$

여기서 아래첨자  $P$ 와  $N$ 은 현재의 셀과 이웃 셀을 나타낸다.  $a_P$ 와  $a_N$ 은 각 셀에서의 계산 매트릭스의 계수를 의미하고,  $S$ 는 소스항을 나타낸다. 위 식을 간단히 나타내기 위해 새로운 인자,  $H(\vec{v})$ ,를 도입하였고, 위 식은 아래와 같이 표현된다.

$$a_P \vec{v}_P = H(\vec{v}) - \nabla P \quad (11)$$

$\vec{v}_P$ 를 소거하기 위해 비압축성 유동의 연속방정식,  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ 를 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{a_P} H(\vec{v}) \right) - \nabla \cdot \left( \frac{1}{a_P} \nabla P \right) = 0 \quad (12)$$

위 식은 비압축성 유동의 속도-압력 연성방정식을 나타낸다. 자세한 설명은 Kissling et al.[16]에 나와 있다.

압축성 유동의 연속방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho \right) + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (13)$$

밀도는 이상기체 상태방정식으로부터 압력으로 대체되고, 압축성 유동에서의 속도-압력 연성방정식은 다음과 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{P} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} P) - P \nabla \cdot \vec{v} \right) \\ &+ \nabla \cdot \left( \frac{1}{a_P} H(\vec{v}) \right) - \nabla \cdot \left( \frac{1}{a_P} \nabla P \right) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

비압축성과 압축성 유동에 대해 압력과 속도의 변수로 이루어진 속도-압력 방정식을 위와 같이 유도하였다. 각 방정식은 속도-압력 연성 알고리즘을 통해 속도와 압력을 계산할 수 있다.

### 3.3 공동 모델

본 논문에서는 액체와 기체 두 개의 상을 모두 고려하는 이상균질모델인 Singhal et al. 모델[4]을 공동모델로 사용하였다. 공동의 생성과 소멸을 나타내는 이송방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (f_v \rho_m) + \nabla \cdot (f_v \rho_m \vec{v}_m) \\ &= \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_v} \nabla f_v \right) + R_e - R_c \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $f_v$ 는 기포의 질량분율을 나타낸다.  $\sigma_v$ 는 기포의 난류 Prandtl 수를 의미한다.  $R_e$ 와  $R_c$ 는 각각 공동의 생성 (evaporation)과 소멸(condensation)을 나타낸다. 압력이 증기압보다 낮을 때는 공동이 생성되며 다음과 같이 정의된다.

$$R_e = C_e \frac{v_{ch}}{\gamma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{MIN(P - P_v, 0)}{\rho_l}} f_v \quad (16)$$

압력이 증기압보다 높을 때는 공동이 소멸되며 다음과 같이 정의된다.

$$R_c = C_c \frac{v_{ch}}{\gamma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{MIN(P - P_v, 0)}{\rho_l}} (1 - f_v) \quad (17)$$

여기서,  $C_e, C_c$ 는 생성과 소멸항의 계수를 나타내며, 각각 0.01을 사용하였다[17].  $v_{ch}$ 는 특성화된 속도로 액체와 기포의 경계면에서 미끄러짐 속도를 나타내고 난류 운동에너지로부터 근사화한  $\sqrt{k}$ 를 사용하였다.

### 3.4 수치 방법

질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 PISO 알고리즘[18]을

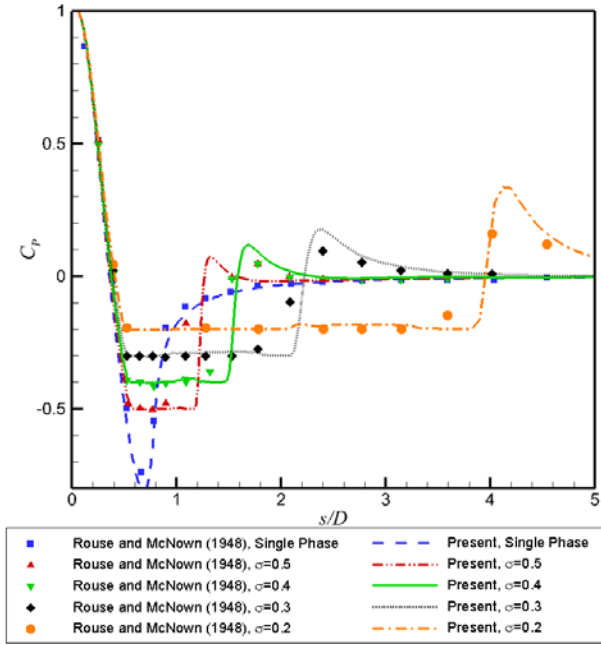


Fig. 2 Influence of cavitation number with incompressible flow CFD code

선택하였다. 대류항은 van Leer 도식[19]으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심차분을 사용하였다. 혼합류에 대해서는 상태방정식으로부터 밀도의 변화를 계산하였다. 계산 매트릭스의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid (AMG) 방법을 사용하였고, 계산 매트릭스는 Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다.

### 4. 해석 결과 및 토의

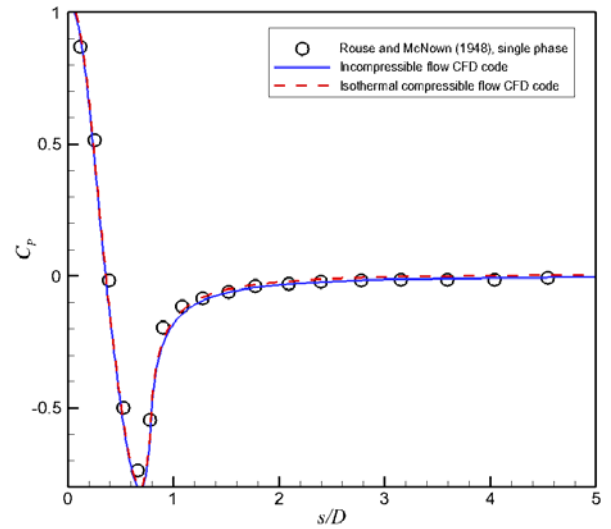
#### 4.1 비압축성 공동 유동 해석

비압축성 공동 유동 CFD 코드를 이용하여 반구형 전두부 실린더에서 발생하는 공동에 대해 계산하였고, Rouse and McNown[20]의 결과와 비교하였다. 계산영역의 크기, 경계조건, 격자 등의 수치방법은 Park and Rhee[14]와 동일하게 적용하였다.

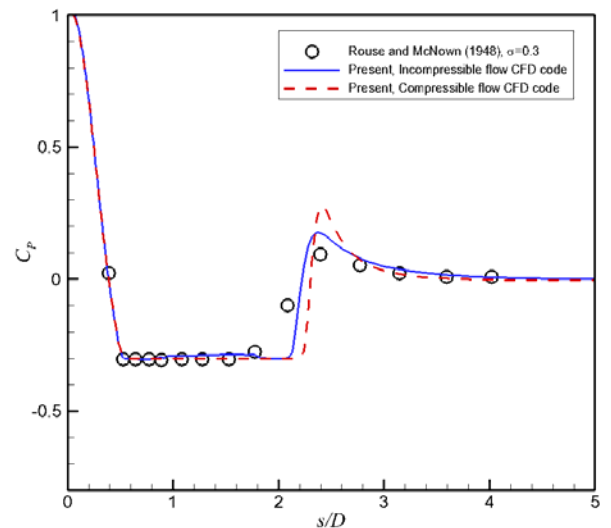
캐비테이션 수( $\sigma$ ) 0.2, 0.3, 0.4, 0.5와 공동이 발생하지 않는 조건에서 계산하였고 Fig. 2와 같이 실험결과와 비교하였다. 가로축은 실린더 표면의 둘레 거리를 나타내고 세로축은 압력계수를 나타낸다. 공동이 소멸되는 위치에서 다소 큰 압력 상승이 나타났지만 전체적으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 압축성 공동 유동 해석

개발된 압축성 유동 CFD 코드를 검증하기 위해 비공동 유



(a) Non-cavitating flow



(b) Cavitating flow with  $\sigma=0.3$

Fig. 3 Influence of compressibility

동과 캐비테이션 수 0.3의 공동 유동을 계산하였다. Fig. 3은 반구형 전두부 실린더 표면에서 측정한 실험결과와 비압축성 및 압축성 유동 CFD 코드의 결과를 비교하고 있다. 압력계수는 시간평균 된 값을 나타낸다. 비공동 유동에 대해서는 비압축성 유동 CFD 코드와 압축성 유동 CFD 코드 간에 거의 동일한 결과를 얻었으며 실험결과와도 잘 일치하였다. 공동 유동에서는 압축성 유동 CFD 코드의 계산결과가 비압축성 유동 CFD 코드의 결과와 비교해 공동이 약간 뒤에서 소멸되었고, 공동 소멸 영역에서 압력 상승이 조금 더 크게 계산되었다. 그러나, 전체적으로 표면에서의 압력분포는 실험과 잘 일치하는 결과를 확인할 수 있다.

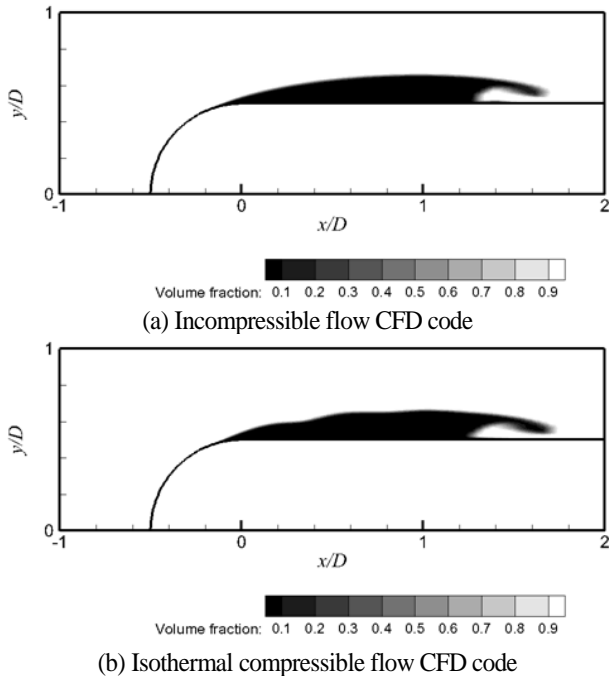


Fig. 4 Volume fraction contours once cavity fully developed

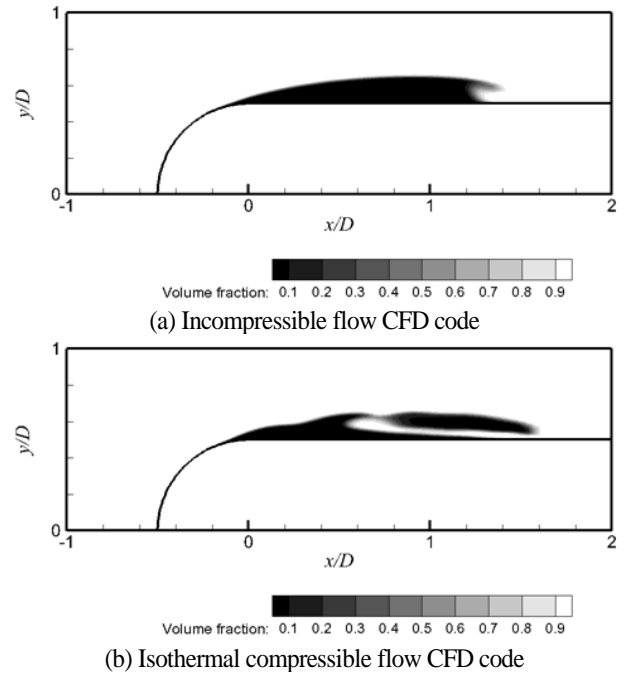


Fig. 6 Volume fraction contours with maximum length of re-entrant jet

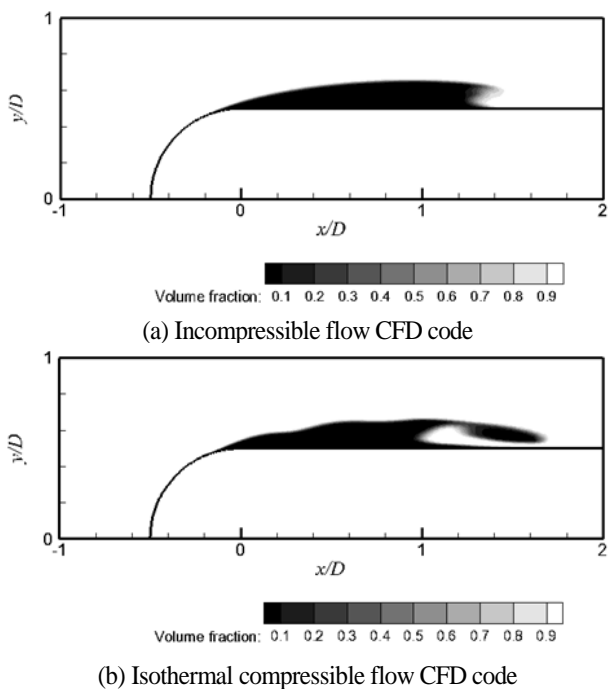


Fig. 5 Volume fraction contours with intermediate length of re-entrant jet

Fig. 4는 두 CFD 코드의 계산결과로 공동이 가장 크게 발달했을 때의 체적분포를 나타낸다. 재돌입제트를 포함하여 전체적인 공동의 현상은 거의 유사하게 계산되었다. 다만 압축성 유동 CFD 코드의 결과에서는 공동 경계면이 출렁이는 것

을 볼 수 있다. 이는 재돌입 제트에 의해 공동이 소멸되는 부분에서 기포의 체적분포가 변화되고 이 변화가 기포 전체의 체적분포에 영향을 주어 기포와 액체의 경계면이 출렁이는 것으로 판단된다.

Fig. 4와 같이 발달된 공동은 재돌입 제트가 발달하면서 Fig. 5를 거쳐 Fig. 6의 형상으로 변화된다. Fig. 6은 재돌입제트가 최대 길이로 발달되어 공동이 진동하는 시점에서의 공동의 체적분포를 나타낸다. 비압축성 유동 CFD 코드의 계산 결과에서는 재돌입제트에 의해 공동의 끝 부분에서만 공동의 진동이 일어나는 것을 확인할 수 있었고, 재돌입 제트가 더 이상 발달하지 않았다. 반면 압축성 유동 CFD 코드의 계산 결과에서는 재돌입 제트가 오랫동안 유지되어 공동의 중간부분까지 영향을 미치고 이로 인해 공동의 중간부분에서 공동이 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있다. 압축성 유동 CFD 코드에서는 상대적으로 크고 긴 재돌입 제트가 발견되었다. 또한, 비압축성 유동 CFD 코드에서는 반구형 전두부 표면에 부착된 공동의 길이가 일정한 반면 압축성 유동 CFD 코드에서는 재돌입 제트에 의해 공동의 길이가 줄어들고 길어지는 것이 반복적으로 관찰되었다. 이와 같은 일련의 공동 방출 현상을 도식화하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 7(a)와 같이 공동이 최대 발달하면 공동이 소멸되는 부분에서 Fig. 7(b)와 같이 재돌입 제트가 발달한다. 발달된 재돌입 제트는 Fig 7(c)와 같이 공동을 둘로 나누고 표면에서 떨어진 공동을 회전시킨다. 떨어진 공동은 후류로 이동하면서 소멸된다. 표

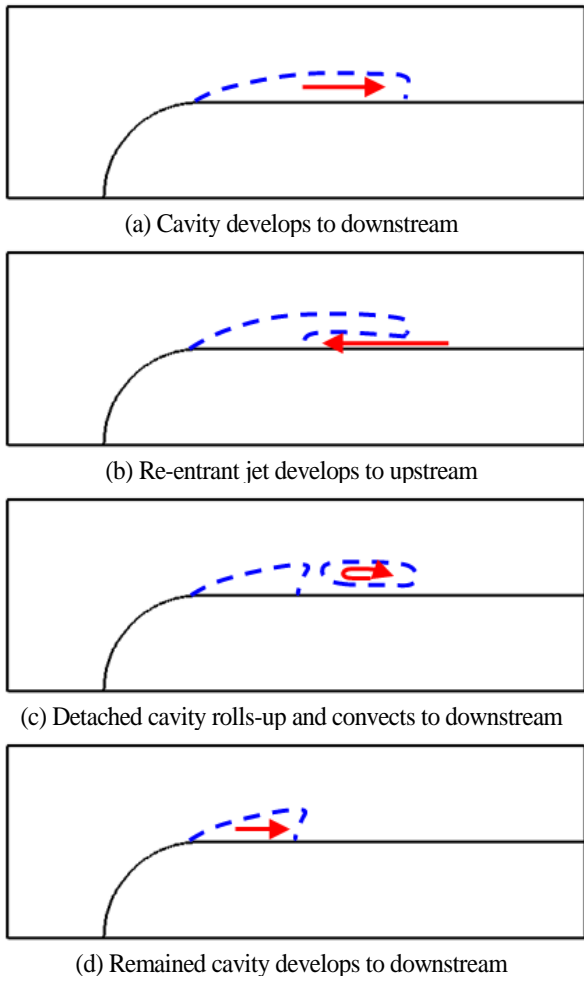


Fig. 7 Schematic view of cavity shedding mechanism

면에 부착되어 남은 공동은 Fig. 7(d)와 같이 후류로 이동하여 Fig. 7(a)와 같은 형상으로 발달한다. 발달된 공동은 Fig. 7(a)-(d) 과정을 반복한다.

Fig. 8은 재돌입제트에 의해 공동이 진동하는 시점에서의 입구경계면의 주유동 속도로 무차원화된  $x$ -방향 속도와 유선을 나타낸다. 압축성 유동 CFD 코드의 결과에서는 비압축성 유동 CFD 코드의 결과에서보다 강하고 긴 재돌입 제트가 계산되었다.

Fig. 9는 캐비테이션 수 0.3에서 압축성 유동 CFD 코드로 반구형 전두부 실린더에 작용하는 항력 계수의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 항력 계수는 반구형 전두부 실린더의  $0 < x/D < 2$  위치에서의 값을 나타낸다. 비압축성 유동 CFD 코드의 계산결과에서는 항력 계수가 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 반면에 압축성 유동 CFD 코드에서는 항력 계수가 공동의 움직임에 따라 일정한 주기를 가지면서 변화하는 것을 확인할 수 있다.

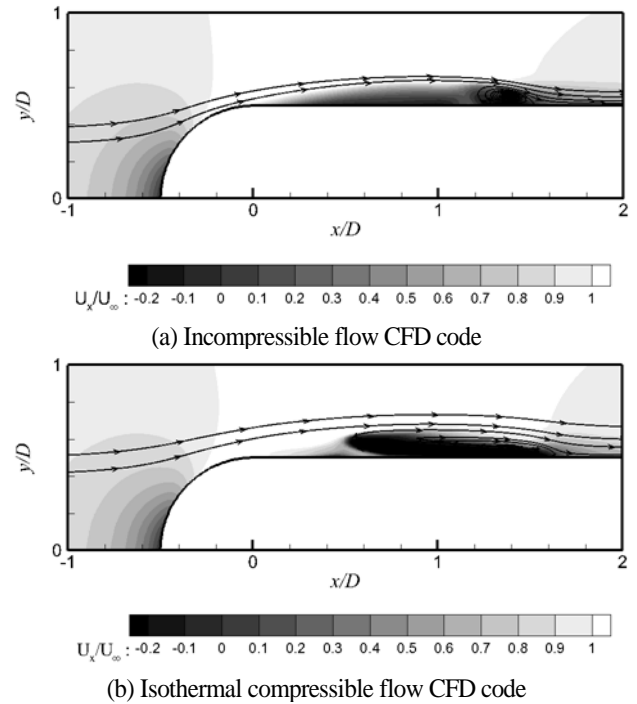


Fig. 8 Non-dimensionalized streamwise velocity contours and streamlines

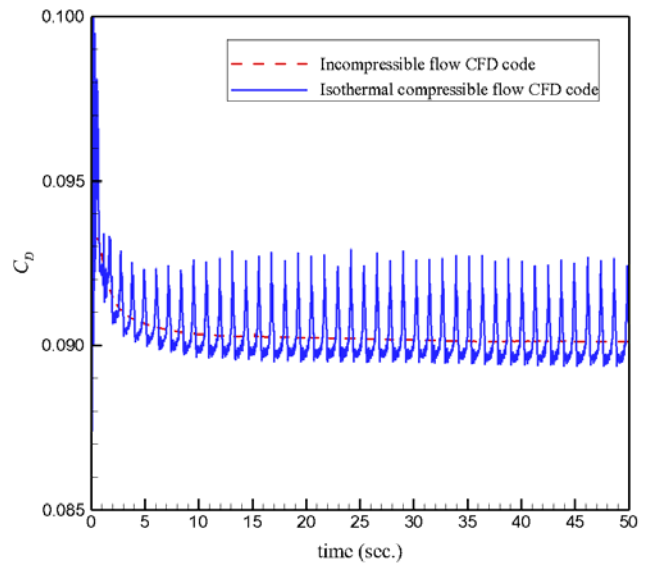


Fig. 9 Drag coefficient history in the surface of  $0 < x/D < 2$

반구형 전두부 실린더의 표면에 작용하는 항력 계수로부터 계산한 Strouhal수를 실험결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Stinebring et al.[21]은 Reynolds수  $0.35 \sim 0.55 \times 10^5$  영역에서 반구형 전두부 실린더 주위에 발생하는 공동 진동의 Strouhal수를 계측하였다. 본 논문에서는 항력 계수의 변화로부터

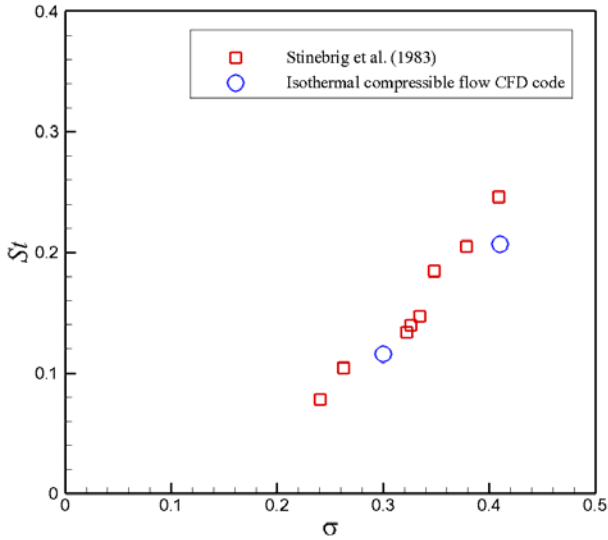


Fig. 10 Strouhal number

Strouhal 수를 계산하였기 때문에 비압축성 유동 CFD 코드의 계산결과에서는 Strouhal 수를 정의할 수 없고, 압축성 유동 CFD 코드의 계산결과에서는 Strouhal 수를 계산하여 Fig. 10에 표시하였다. 계산된 결과는 실험과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

공동현상에서의 압축성 효과를 알아보기 위해서 압력기반 압축성 유동 CFD 코드를 개발하여 반구형 전두부 실린더 주위에 발생하는 공동현상에 대해 적용하였다. 개발된 압축성 유동 CFD 코드를 이용하여 비공동과 공동 유동에 대해 계산하였고 비압축성 유동 CFD 코드의 계산결과 및 실험결과와 비교하여 검증하였다. 공동이 완전히 발달된 형상에 대해서는 비압축성 및 압축성 유동 CFD 코드의 계산결과가 동일하게 계산되었으나, 압축성 유동 CFD 코드의 계산결과에서는 비정상 재돌입 제트의 영향으로 경계면에서 출렁이는 결과를 발견하였다. 또한, 압축성 유동 CFD 코드의 계산결과에서는 비압축성 유동 CFD 코드의 계산결과와 비교해 재돌입 제트가 크고 길게 계산되었으며, 이로 인해 공동이 진동하는 위치가 다르게 계산되었다. 반구형 전두부 실린더 표면에서 공동 진동에 의해 변화되는 항력 계수를 계산하였다. 비압축성 유동 CFD 코드의 계산결과에서는 항력 계수가 일정하게 계산된 반면 압축성 유동 CFD 코드 계산결과에서는 일정한 주기를 가지면서 반복되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 항력 계수 분포로부터 계산된 Strouhal 수는 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 비압축성 유동 CFD 코드가 공동의 물리현

상인 재돌입 제트 및 Strouhal 수를 잘 모사하고 있기 때문에 공동의 거동을 잘 표현하기 위해서는 비압축성 유동 CFD 코드보다는 압축성 효과가 포함된 압축성 유동 CFD 코드가 필요하다.

### 후 기

이 논문은 국방과학연구소의 “초공동 수중 운동체 통합연구(09-01-05-26)”, 2013학년도 한국해양대학교 “신진교수정착연구비”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2011 Autumn Annual meeting, Yeungnam University, Daegu, November 11, 2011.

### References

- [1] 1998, Merkle, C.L., Feng, J. and Buelow, P.E.O., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," *Proceedings of 3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France.
- [2] 1999, Kunz, R.F., Stinebring, D.R., Chyczewski, T.S., Boger, D.A. and Gibeling, H.J., "Multi-Phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies," *Proceeding of 3rd ASME/JSME Joints Fluid Engineering Conference - ASME Paper FEDSM 99-7364*.
- [3] 2001, Schnerr, G.H. and Sauer, J., "Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics," *Proceedings of 4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA.
- [4] 2002, Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H. and Jiang, Y., "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.124, pp.617-624.
- [5] 2004, Shin, B.R., Yamamoto, S. and Yuan, X., "Application of preconditioning method to gas-liquid two-phase flow computations," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.126, pp.605-612.
- [6] 2001, Dittakavi, N., Chunekar, A. and Frankel, S., "Large eddy simulation of turbulent-cavitation interactions in a Venturi nozzle," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.132, pp.121301-11.

- [7] 1997, Rincon, J. and Elder, R., "A high-resolution pressure-based method for compressible flows," *Computers & Fluids*, Vol.26, No.3, pp.217-231.
- [8] 1998, Issa, R.I. and Javareshkian, M.H., "Pressure-based compressible calculation method utilizing total variation diminishing schemes," *AIAA Journal*, Vol.36, No.9, pp.1652-1657.
- [9] 2008, Darbandi, M., Roohi, E. and MOKARIZADEH, V., "Conceptual linearization of Euler governing equations to solve high speed compressible flow using a pressure-based method," *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, Vol.24, pp.583-604.
- [10] 2008, Javadi, K., Darbandi, M. and Taeibi-Rahni, M., "Three-dimensional compressible-incompressible turbulent flow simulation using a pressure-based algorithm," *Computers & Fluids*, Vol.37, pp.747-766.
- [11] 2008, Kadioglu, S.Y. and Sussman, M., "Adaptive solution techniques for simulating underwater explosions and implosions," *Journal of Computational Physics*, Vol.227, pp.2083-2104.
- [12] 2002, Venkateswaran, S., Lindau, J.W., Kunz, R.F. and Merkle, C.L., "Computation of multiphase mixture flows with compressibility effects," *Journal of Computational Physics*, Vol.180, pp.54-77.
- [13] 2010, Goncalves, E., Champagnac, M. and Patella, R.F., "Comparison of numerical solvers for cavitating flows," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.24, No.6, pp.201-216.
- [14] 2011, Park, S. and Rhee, S.H., "Numerical Analysis of Super-cavitating flow around two-dimensional and axisymmetric bodies," *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.1, pp.14-21.
- [15] 1972, Launder, B.E. and Spalding, D.B., "Lectures in Mathematical Models of Turbulence," *Academic Press*, London, UK.
- [16] 2010, Kissling, K., Springer, J., Jasak, H., Schutz, S., Urban, K. and Piesche, M., "A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids," *Proceedings of the 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics*, Lisbon, Portuga.
- [17] 2011, Park, S. and Rhee, S.H., "Numerical investigation of unsteady cavitating flow on a three-dimensional twisted hydrofoil" *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.3, pp.37-46.
- [18] 1985, Issa, R.I., "Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting," *Journal of Computational Physics*, Vol.62, pp.40-65.
- [19] 1979, van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme," *Journal of Computational Physics*, Vol.32, No.1, pp.101-136.
- [20] 1948, Rouse, H. and McNown, J.S., "Cavitation and Pressure Distribution in Engineering," Bulletin 32 (State University of Iowa).
- [21] 1983, Stinebring, D.R., Billet, M.L. and Holl, J.W., "An Investigation of cavity cycling for ventilated and natural cavities," *TM 83-13, Pennsylvania State University Pressure*, University Park, PA.