대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 54, No. 4, pp. 321-328, August 2017
eISSN:2287-7355, https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.4.321

벽면효과를 받는 2차원 쐐기형 몰수체의 공동 유동에 대한 수치해석

김지혜·안병권†
충남대학교 선박해양공학과

Numerical Analysis of Cavitating Flow around Two-dimensional Wedge-shaped Submerged Bodies under the Wall Effect

Ji-Hye Kim·Byoung-Kwon Ahn†
Chungnam National University, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

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.

In practice, cavitation phenomena occur in unbounded flows. However, the wall effect is unavoidable during experiments at a closed section such as a cavitation tunnel. Especially, supercavity generated behind a cavitator is relatively large and thick, so that geometric and dynamic characteristics of the cavity are affected by the tunnel wall. In order to apply experimental results into the unbounded flow field, physical correlations are necessary. In this paper, we proposed an image method based on a potential flow to simulate the wall effect. Considering two-dimensional wedge-shaped bodies, configurations and drag characteristics of the cavity were examined according to the distance ratio to the wall surface. The results were compared and verified with existing theoretical and experimental results.

Keywords : Cavitation tunnel(캐비테이션터널), Cavitating flow(공동 유동) Wall effect(벽면효과), Potential flow(포텐셜 유동), Image method(경상법)

1. 서 론

선박용 추진기를 비롯한 다양한 기계류에서 발생하는 공동 유동의 발생 및 성장 특성을 살피고자 오랜 시간에 걸쳐 다양한 실험 연구가 수행되어져 왔다. 그 중 캐비테이션 터널 실험은 폐쇄된 터널의 유동을 가속하거나 터널 내부 압력을 감압함으로써 모형에서 발생하는 공동 유동의 특성을 관측하는 가장 효과적인 실험 방식으로 잘 알려져 있다. 하지만 캐비테이션 터널 내부에서 발생하는 초월공동(supercavitation)은 부분공동보다 상대적으로 크고 두꺼운 형상이기 때문에 터널의 벽면효과(wall effect)를 피할 수 없으며, 실제 초월공동은 벽면효과가 없는 상태에서 발생하기 때문에 캐비테이션 터널에서 수행한 실험 결과는 이를 고려하여 무한영역에 해당하는 값으로 확장할 수 있어야 한다. 이러한 벽면효과를 받는 공동 유동에 대한 수치해석 연구로 Birkhoff, et al. (1950)과 Birkhoff and Zarantonello (1957)는 터널 시험부에 대한 검사체적(control volume)을 고려하여 연속방정식과 비점성 유동의 운동량방정식을 재정리하였다. 그 결과 특정한 크기를 갖는 터널에서 구현 가능한 최소 캐비테이션 수는 공동의 최대 두께와 터널 직경의 비에 따라 계산할 수 있음을 제안하였으며, Karlikov and Sholomovich (1966)는 축대칭 유동에 대한 이론해석을 통해 벽면효과를 받는 터널에서의 실험 결과를 무한영역으로 확장하는 방법을 제시하였다. 또한 Brennen (1969)은 비점성 해석법에 기초하여 벽면효과를 받는 공동 유동의 수치해석 결과를 실험과 비교하여 검증하였으며, Wu, et al. (1971)은 다양한 후류 모델에 적용할 수 있는 벽면효과 보정법을 제안하고 이를 실험결과와 비교하였다. 이후 2000년대에 들어서 국내에서도 초월공동에 대한 관심이 높아짐에 따라 이전의 연구시설과 비교하여 고속화 및 실험 성능이 향상된 캐비테이션 터널에서 모형시험이 이뤄지고 있으며, 터널 내부에 작용하는 벽면효과에 대한 보정법을 재정립할 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

본 연구팀에서는 그동안 초월공동의 발생과 성장 특성을 규명하기 위하여 충남대학교 캐비테이션 터널(CNUCT)에서 다양한 실험 연구 (Ahn, et al., 2010; Jeong & Ahn, 2016)와, 비점성

Received : 8 March 2017 | Revised : 2 May 2017 | Accepted : 26 June 2017
† Corresponding author : Byoung-Kwon Ahn, bkahn@cnu.ac.kr

경계요소법(boundary element method)에 기반 한 공동 유동 해석법 (Ahn, et al., 2012; Kim, et al., 2013; Kim, et al., 2016)을 개발해왔다. 본 연구에서는 경상법(image method)을 적용하여 터널의 벽면효과를 모사할 수 있는 해석법을 개발하였으며, 해석결과를 기존의 실험 및 이론해석 결과 (Wu, et al., 1971)와 함께 비교하여 검증하고자 하였다. 먼저 초월공동 발생 장치로 사용되는 캐비테이터(cavitator)의 대표적 형상 중 하나인 쐐기형 물체를 대상으로 후류 모델링에 따른 공동 유동의 특성을 비교, 분석하였으며, 벽면과의 거리 비에 따라 나타나는 공동의 형상변화와 항력특성을 평가하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 무한 영역에서의 공동 유동 수치해석 방법

공동이 비점성, 비압축성, 비회전성 유체의 정상 상태인 무한 유동장 중에서 발생한다고 가정한다. 이러한 가정의 포텐셜 유동에 대한 지배방정식은 Laplace 방정식으로 식 (1)로 표현할 수 있으며, 전체 속도 ∇는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이때, φ는 교란 속도 포텐셜, Φ는 전체 속도 포텐셜, ∇$_\infty$는 유입속도, $\vec{x}$는 위치벡터를 나타낸다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

$$\vec{V} = \nabla \Phi = \nabla (\overrightarrow{U_\infty} \cdot \vec{x} + \phi) \tag{2}$$

경계 조건으로 무한 원방에서는 유입속도가 몰수체에 의해 교란되지 않으며(식 (3)), 유체는 몰수체 표면을 통해 침투할 수 없다(식 (4)). 여기서 $\hat{n}$은 몰수체 표면에서 유체 영역을 향하는 단위법선 벡터이다.

$$\nabla \Phi \rightarrow \overrightarrow{U_\infty}, at \ \vec{x} \rightarrow \infty \tag{3}$$

$$\hat{n} \cdot \vec{V} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \tag{4}$$

공동이 발생한 이후 공동 표면에서의 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건은 다음과 같다. 계산이 수렴된 이후에 공동의 형상은 시간과 공간에 있어 변하지 않으며, 공동 표면에서의 압력은 유체의 증기압(p_v), 즉, 공동 내부의 압력과 동일하다.

$$\frac{Df(x,y,t)}{Dt} = 0 \tag{5}$$

$$p = p_v \tag{6}$$

여기서 f(x,y,t)는 공동의 표면을 나타내는 함수이다. 이렇게 발생한 공동의 두께(t^c)는 공동의 끝단(l_c)에서 다음 식 (7)의 공동 마감조건을 만족하도록 한다.

$$t^c(l_c) = 0 \tag{7}$$

경계면으로 둘러싸인 무한 유체 영역에서 지배방정식을 만족하는 속도 포텐셜은 다음 식 (8)의 Green 정리를 만족한다.

$$\phi = \int_S \left[(-\phi) \frac{\partial G}{\partial n} + \frac{\partial \phi}{\partial n} G \right] dS \tag{8}$$

$$G = \frac{\ln r}{2\pi} \tag{9}$$

식 (9)의 Green 함수를 적용하여 식 (8)을 다시 정리하면 다음 식 (10)과 같이 적분방정식을 정리할 수 있으며, 이때, r은 제어점에서 각 패널 위의 특이점에 이르는 거리이다.

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_S \left[(-\phi) \frac{\partial \ln r}{\partial n} + \frac{\partial \phi}{\partial n} \ln r \right] dS \tag{10}$$

전체 경계면에 다이폴(dipole)을, 공동 표면에 소스(source)를 분포하여 문제를 정식화하였다. 앞서 주어진 경계조건을 적용하여 다이폴 및 소스의 세기를 결정하고, 이를 통해 공동의 형상 및 공동 주위의 유동을 해석하였다. 이때, 경계면에 분포된 다이폴과 소스의 세기 μ와 q는 각각 경계면 사이의 속도 포텐셜의 차이와 법선 방향 속도의 차이와 같고, 경계면의 내부 유동은 존재하지 않는다는 조건을 적용하여 식 (11)과 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \phi^- - \phi^+ = -\phi^+ \tag{11}$$

$$q = \frac{\partial \phi^+}{\partial n} - \frac{\partial \phi^-}{\partial n} = \frac{\partial \phi^+}{\partial n} \tag{12}$$

위의 식들을 적용하여 식 (10)을 다시 정리하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 경계면의 유한 요소인 각 패널 상에서의 소스와 다이폴의 세기는 일정하다고 가정한다.

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_S \left[\mu \frac{\partial \ln r}{\partial n} + q \ln r \right] dS \tag{13}$$

본 연구에서는 주어진 공동 길이를 만족하는 공동 형상과 캐비테이션 수를 반복적으로 계산하여 구하는 방법을 사용하였다. 즉, 공동 내부의 압력을 계산하는 대신에 특정한 공동 길이를 입력 값으로 하고, 그와 같은 공동이 생성될 때 공동 표면에서의

접선속도(∇_t)를 구함으로써 공동 표면의 압력을 계산하게 된다. 따라서 공동 표면에서의 속도 포텐셜은 접선속도 성분을 공동 표면을 따라 적분함으로써 정의할 수 있다.

$$\mu(\underline{x}) = \mu_{C.T.E.} - \overrightarrow{V_t}\int_0^s ds \tag{14}$$

이때, $\mu_{C.T.E.}$는 몰수체 끝단에서의 다이폴의 세기를 나타낸다. 또한, 소스의 세기는 공동의 두께를 공동 표면을 따라 미분한 값과 유입속도와의 곱으로 아래 식 (15)와 같이 정의할 수 있으며, 이를 적분하여 공동의 두께를 계산할 수 있다(식 (16)).

$$q = \left|\overrightarrow{U_\infty}\right|\frac{dt^c}{ds} \tag{15}$$

$$t^c(x) = \int_0^x \frac{q}{\left|\overrightarrow{U_\infty}\right|}ds \tag{16}$$

몰수체 몸체를 S_B, 공동 표면을 S_C라고 할 때, Kutta 조건을 적용하면 적분방정식은 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\phi = \frac{1}{2\pi}\int_{S_B\cup S_C}\left[\mu\frac{\partial \ln r}{\partial n}\right]dS + \frac{1}{2\pi}\int_{S_C}\left[q\ln r\right]dS + \frac{1}{2\pi}\int_{S_W}\left[(-\triangle\phi)_W\frac{\partial \ln r}{\partial n}\right]dS \tag{17}$$

이때, S_W는 공동의 후류면을 의미하며, 식 (17)을 이산화하여 나타내면 다음 식 (18)과 같다. 여기서, N^D와 N^S는 다이폴과 소스의 개수, $D_{i,j}$와 $D_{wi,j}$는 다이폴에 의해 유기된 포텐셜, 그리고 $S_{i,k}$는 소스에 의해 유기된 포텐셜을 나타낸다.

$$\phi_i = \sum_{j=0}^{N^D-1}\mu_j D_{i,j} + \sum_{k=0}^{N^S-1} q_k S_{i,k} + (-\triangle\phi)_W D_{i,j}^w \tag{18}$$

공동 후류 상, 하면의 압력 점프는 식 (19)로 정의할 수 있으며,

$$\triangle\phi = \left(\phi_0 - \phi_{N^D-1}\right) + \left(\overrightarrow{r_0} - \overrightarrow{r_{N^D-1}}\right)\cdot\overrightarrow{U_\infty} \tag{19}$$

이를 적용하면, 식 (18)은 다음과 같이 정리된다.

$$\phi_i = \sum_{j=0}^{N^D-1}\mu_j D_{i,j} + \sum_{k=0}^{N^S-1} q_k S_{i,k} + (\vec{r}\cdot\overrightarrow{U_\infty})D_{i,j}^w \tag{20}$$

여기서 r은 공동 끝단의 상, 하 패널의 거리 벡터이다. 경계조건인 식 (14)와 (15)를 포함하여 정리하면 다음 식 (21)과 같이 최종적인 이산화된 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=0}^{N^P-1}\mu_j D_{i,j} + \mu_{N^P-1}\sum_{j=N^P}^{N^D-1} D_{i,j} - \sum_{j=N^P}^{N^D-1}(\overrightarrow{V_t}\cdot g_j)D_{i,j} + \sum_{k=0}^{N^S-1} q_k S_{i,k} = -\overrightarrow{U_\infty}\cdot\vec{x} - (\vec{r}\cdot\overrightarrow{U_\infty})D_{i,j}^w \tag{21}$$

여기서 NP는 몸체에 분포한 다이폴의 개수이다($N^D=N^P+N^S$). 이산화된 적분방정식의 미지수는 몰수체 표면에 위치한 다이폴과 공동 표면에 위치한 소스의 세기, 그리고 공동 표면에서의 접선속도이며, 선형대수적인 방법으로 계산된다. 계산된 미지수 다이폴의 세기로 속도 포텐셜을 구할 수 있으며, 소스의 세기로 이루어진 공동 미감 조건을 만족하도록 반복 계산을 수행한다.

2.2 벽면 효과를 받는 공동 유동 모델링: 경상법

받음각이 없고 α의 각도를 갖는 2차원 쐐기형 몰수체를 다음 Fig. 1의 실선과 같이 표현할 때, 시험 모델이 터널 내부를 차지하는 비율을 d_C/D로 표현하였다. 이는 d_C/D가 작을수록 벽면 효과를 받지 않는 무한영역 조건에 가까우며, d_C/D가 커질수록 몰수체와 공동의 기하학적 형상에 따라 벽면 효과를 많이 받음을 의미한다. 이때 벽면은 기본 형상의 위, 아래에 동일 형상의 경상 이미지를 위치시킴으로써 물리적 경계조건을 만족시키도록 하였다.

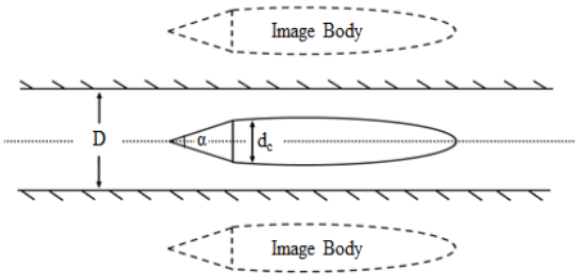


Fig. 1 Schematic view of the body under the wall effect

기본 형상과 이미지 형상 사이의 거리, 즉 폐색률(blocakge ratio)을 나타내는 d_C/D 값을 바꿔가며 벽면 효과를 평가하였다. 이미지 형상에 분포한 다이폴과 소스가 기본 형상에 미치는 영향을 고려하여 기본 형상의 속도 포텐셜을 계산하며 이산화된 적분방정식은 다음 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=0}^{N^P-1}\mu_j D_{i,j}^S + \mu_{N^P-1}\sum_{j=N^P}^{N^D-1} D_{i,j}^S - \sum_{j=N^P}^{N^D-1}(\overrightarrow{V_t}\cdot g_j)D_{i,j}^S + \sum_{k=0}^{N^S-1} q_k S_{i,k}^S = -\overrightarrow{U_\infty}\cdot\vec{x} - (\vec{r}\cdot\overrightarrow{U_\infty})D_{i,j}^w \tag{22}$$

여기서, $D^S_{i,j}$와 $S^S_{i,k}$는 기본 형상과 상, 하 두 경계면에 위치시킨 각각의 이미지에 분포된 다이폴과 소스에 의해 유기하는 포텐셜이다.

$$D^S_{i,j} = D_{i,j} + D_{1,i,j} + D_{2,i,j} \quad (23)$$
$$S^S_{i,j} = S_{i,k} + S_{1,i,k} + S_{2,i,k}$$

3. 수치해석 결과

Wu, et al. (1971)의 이론 및 실험 결과와의 비교를 통해 본 해석방법을 검증하고자 하였다. Wu, et al. (1971)은 캐비테이션 터널과 같이 제한된 영역에서 발생하는 공동유동의 특성을 파악하고 이를 보정할 수 있는 공식을 도출하고자 하였다. 이를 위해 쐐기형 물체의 후류에서 발생하는 공동 유동을 Open wake model과 Riabouchinsky model을 적용하여 이론적으로 해석하고 실험결과와 비교, 평가하였다(Fig. 2 참조). 여기서 Open wake model은 마감되지 않은 후류면을 갖는 공동 표면이 압력이 일정한 부분과 점진적으로 변하는 부분으로 나누어지며, 압력이 점진적으로 변하는 부분은 공동 표면이 유동 방향과 평행하도록 한다. Riabouchinsky model의 경우 공동의 최대 두께가 형상되는 지점, 즉 유동 속도가 가장 빠른 지점을 기준으로 공동이 쐐기형 몰수체와 대칭되는 형상으로 마감되도록 모델링(경상법)하였다. 본 해석법에서는 공동의 초기 형상을 2차식의 유선형으로 가정하고 공동 마감을 위해 공동 표면에 분포된 소스의 합이 0이 되도록 반복계산을 수행하였으며, 이는 얇은 비행익 이론에의 소스 세기와 공동 두께의 선형 관계를 이용한 것으로 선형 공동 마감 모형이라고 정의한다.

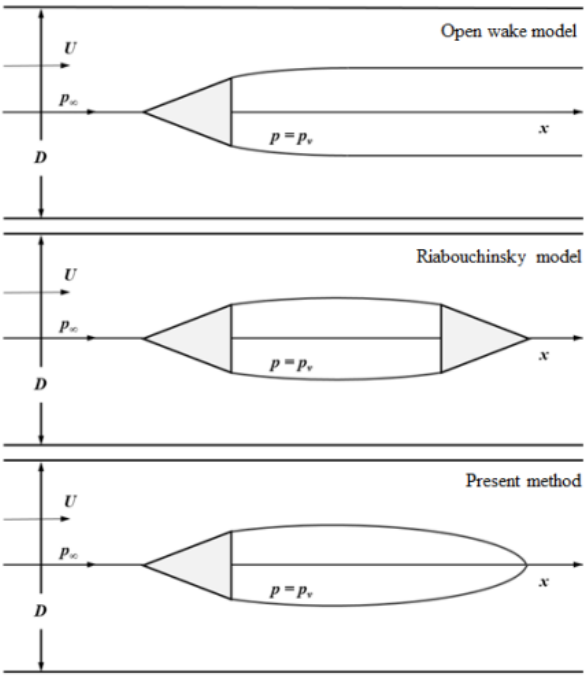


Fig. 2 Comparison of cavity wake models

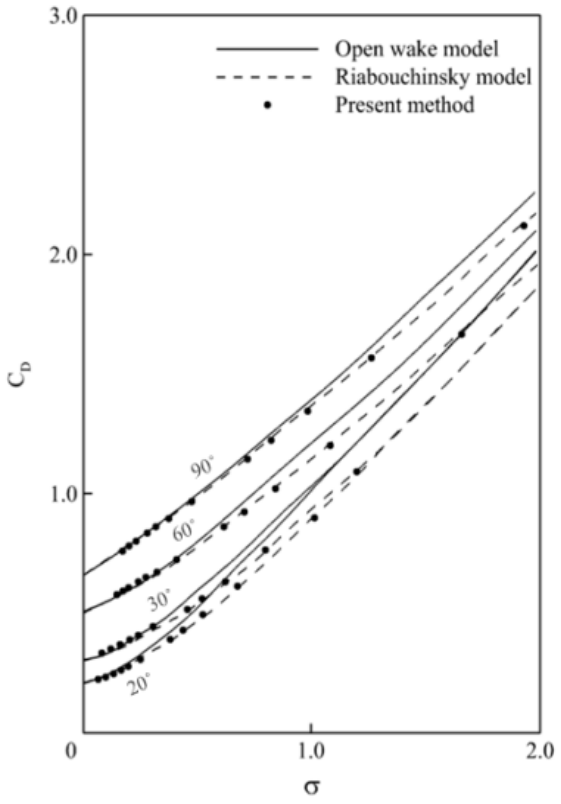
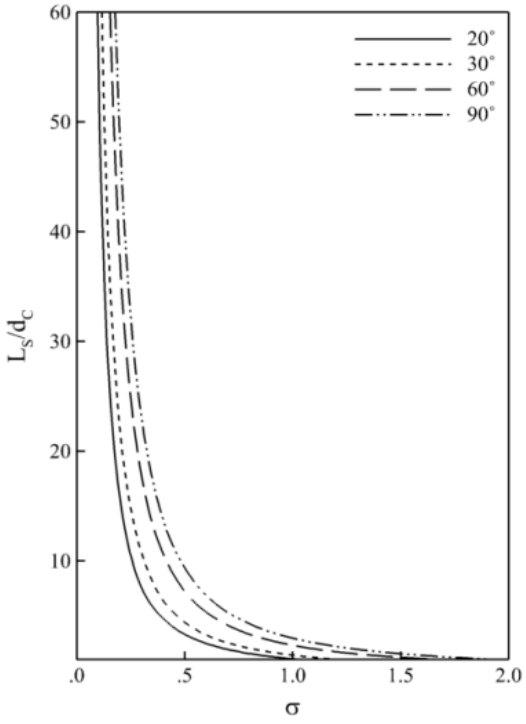
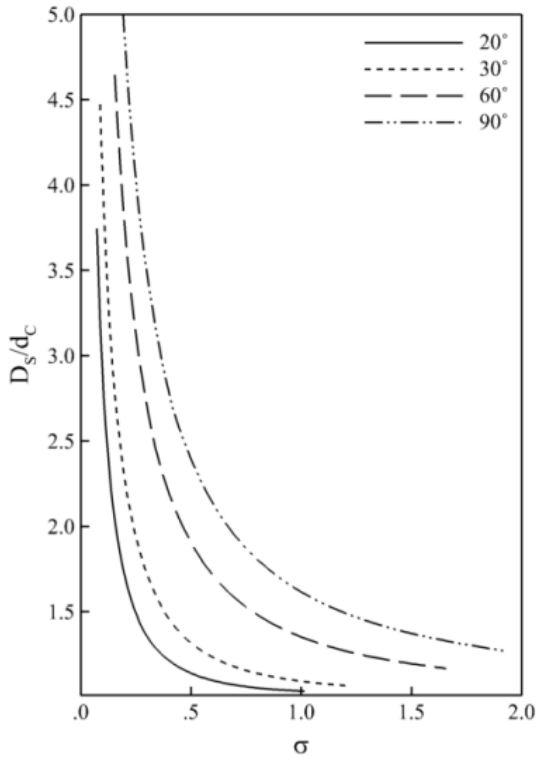


Fig. 3 Drag coefficients of wedges in unbounded flow

Riabouchinsky model과 본 연구 모델은 유사한 마감 형태를 보이지만, Riabouchinsky model의 경우 공동의 길이와 상관없이 제한된 마감형상을 갖으며 이는 결과적으로 항력특성에도 영향을 미친다는 단점이 있다. Fig. 3에는 후류 모델에 따라 몰수체의 각도가 20, 30, 60, 90°일 때, 벽면 효과가 없는 무한영역 조건($d_C/D=0$)에서 캐비테이션수에 따른 항력특성을 비교하여 도시하였다. Open wake model의 경우 Riabouchinsky model을 적용 했을 때보다 몰수체가 받는 항력 값이 크며, 이는 몰수체의 각도가 작을수록 또는 캐비테이션수가 클수록(상대적으로 작은 공동이 생성되는 경우) 그 차이가 분명하게 나타난다. Fig. 2에 도시된 후류 모델의 특성상 공동 마감 형상이 유사한 Riabouchinsky model을 적용한 결과와 본 연구의 수치해석 결과의 캐비테이션수에 따른 항력특성이 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 4는 벽면 효과가 없는 무한영역 조건에서의 캐비테이션수에 따라 발생하는 공동의 형상 특성을 보여준다. 여기서 L_S와 D_S는 각각 발생한 공동의 길이와 최대 폭을 나타내며, 몰수체의 직경(d_C)으로 무차원화하여 나타내었다. 이를 통해 캐비테이션수가 작아짐에 따라 성장하는 초월공동의 길이와 두께를 정량적으로 평가할 수 있다. Fig. 5는 몰수체의 각도가 30°이고 dc/D가 0.107, 즉 몰수체가 전체 유동의 약 11% 정도를 막고 있을 때, 캐비테이션수 변화에 따른 몰수체 윗면의 압력계수를 보여준다. 이때, 몰수체 윗면을 따라 증가하는 길이 변수 s를 몰수체 윗면의 길이(S)로 무차원하여 나타내었다.



(a) Non-dimensionalized cavity length



(b) Non-dimensionalized cavity max. diameter

Fig. 4 Predicted cavity shapes in unbounded flow

실선은 Riabouchinsky model을 적용한 이론해석 결과이며, Wu, et. al. (1971)이 제시한 실험결과와 함께 비교하였을 때 본 해석방법을 통한 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 캐비테이션수가 작아져 공동의 형상이 크게 생성될수록 몰수체 윗면의 압력특성이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 몰수체의 각도가 30°일 때 캐비테이션수에 따라 몰수체가 받는 항력계수를 나타낸다. 기존의 실험결과와 실선으로 나타낸 이론해석 결과가 본 수치해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다. Fig. 7은 몰수체의 각도가 9°일 때, 캐비테이션수와 벽면 효과에 따른 몰수체 윗면에 작용하는 압력분포를 나타낸 결과이다.

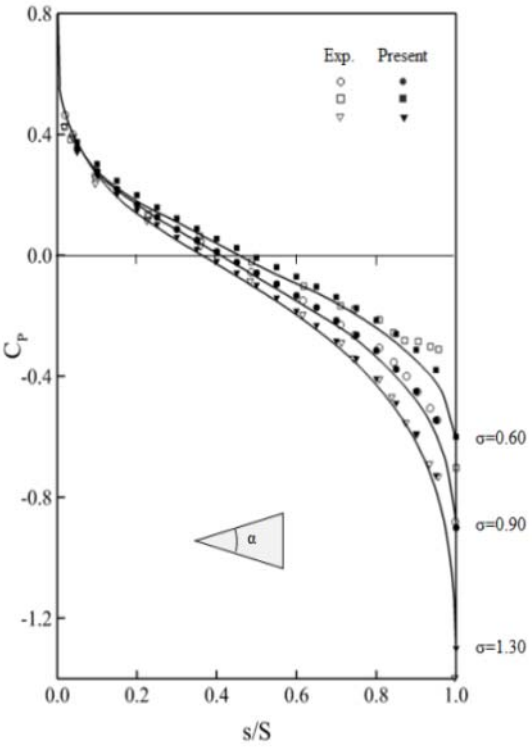


Fig. 5 Pressure distributions on the 30° wedges

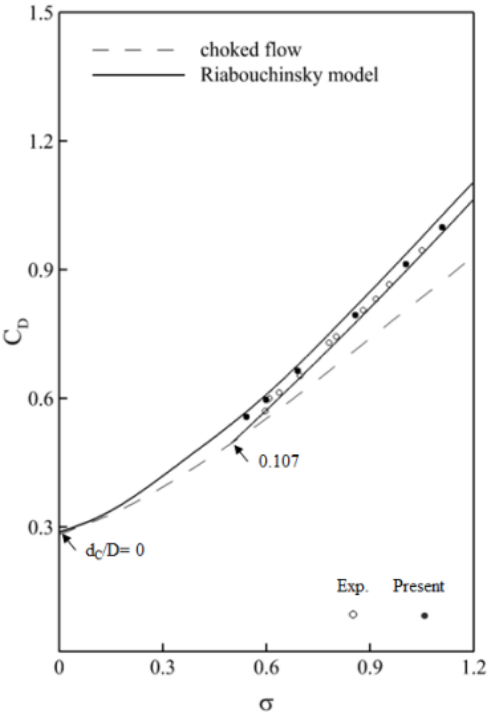


Fig. 6 Drag coefficient for the 30° wedges

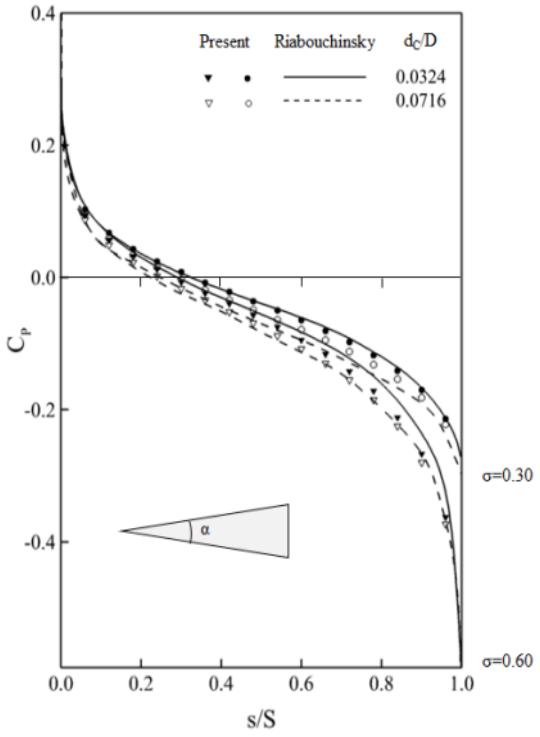


Fig. 7 Pressure distributions on the 9° wedges

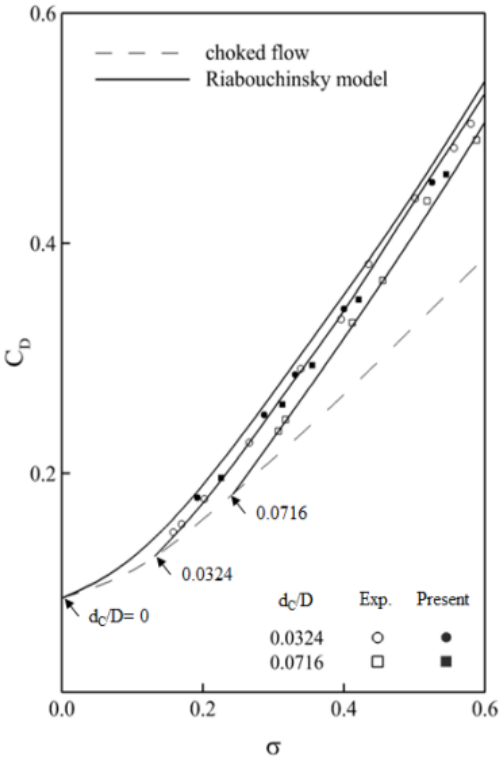


Fig. 8 Drag coefficient for the 9° wedges

실선과 점선은 각각 폐색률이 0.0324와 0.0716, 즉 몰수체가 전체 유동의 대략 3%와 7% 정도를 막고 있을 경우에 해당하는 Wu, et al. (1971)의 이론해석 결과를 보여준다. 동일한 캐비테이션수 조건에서 폐색률이 커질수록, 즉 벽면의 효과가 커질수록 압력이 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는 벽과 몰수체 사이의 공간이 상대적으로 좁아짐에 따라 몰수체 주변의 유동이 가속되어 압력이 낮아지는 현상으로, 실험으로 검증된 이론해석 결과와 본 수치해석법의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 8은 몰수체의 각도가 9°일 때 캐비테이션수에 따른 항력계수를 폐색률에 따라 나타내었으며, 앞선 결과와 마찬가지로 동일한 캐비테이션수 조건에서 폐색률이 커질수록, 즉 벽면 효과가 커질수록 항력이 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 몰수체의 각도가 30°와 90°일 때, 벽면효과에 따라 발생하는 공동의 최대 폭과 길이를 무차원화하여 도시하였다. 폐색률이 커질수록, 즉 동일한 캐비테이션수 조건에서 벽면 효과가 크게 작용할수록 공동의 폭과 길이가 모두 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 발생한 공동의 형상이 유선형에 가까워짐에 따라 몰수체에 작용하는 항력 값이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 11은 몰수체의 각도가 각각 30°와 90°인 경우에 대하여 폐색률이 0에서 0.1까지 변할 때 각 후류 모델별 캐비테이션수에 따른 항력계수를 보여준다. Riabouchinsky model을 적용한 이론해석 결과와 본 수치해석을 통한 계산 결과가 두 각도 조건 모두 비교적 잘 일치하고 있으며, 몰수체의 각도가 작을수록 그리고 캐비테이션수가 클수록(발생한 공동의 길이가 짧을수록) 벽면의 효과를 크게 받음을 알 수 있다.

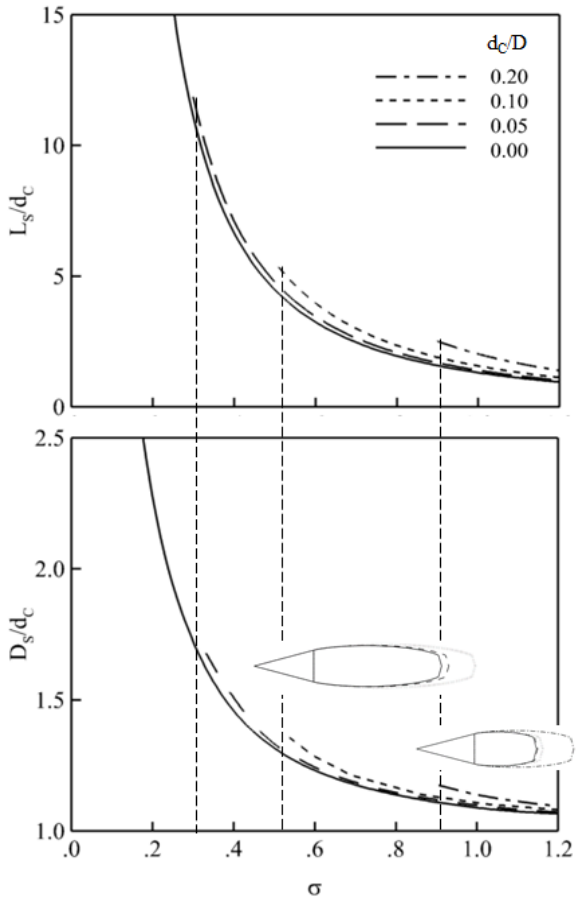


Fig. 9 Simulation of wall effect for the 30° wedges

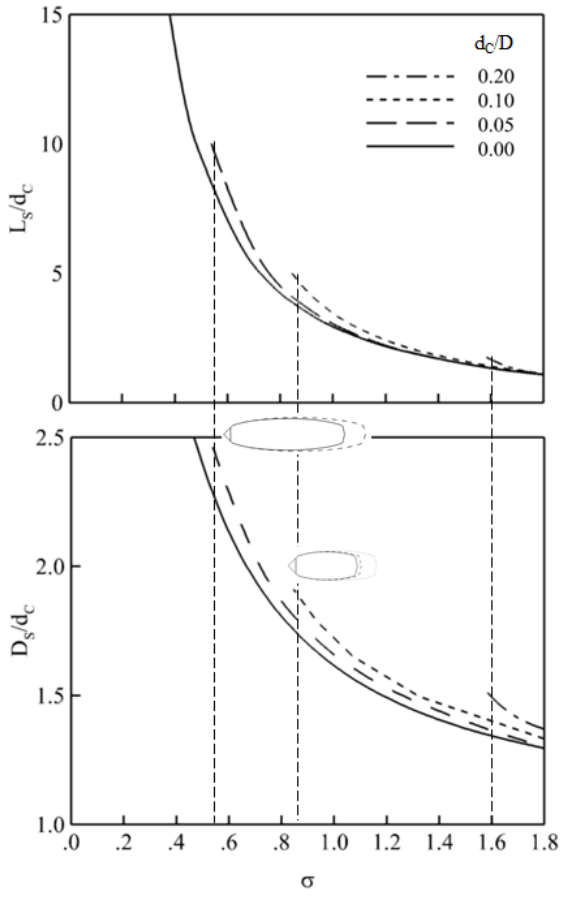


Fig. 10 Simulation of wall effect for the 90° wedges

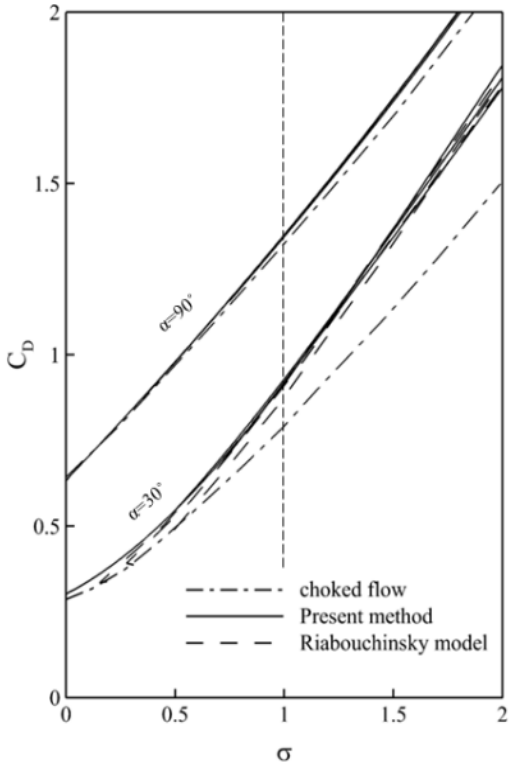


Fig. 11 Drag coefficient for the 30° and 90° wedges

4. 결 론

최근 초월공동에 대한 관심이 높아지면서 캐비테이션 터널에서의 모형시험 연구가 증가하고 있다. 제한된 유동장에서 구현되는 초월공동의 경우 터널의 벽면 효과를 받게 되며, 이에 대한 정량적 특성을 평가할 수 있어야 무한영역에서 발생하는 실제 초월공동에 대한 유의미한 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 캐비테이션 터널과 같이 제한된 유동장에서 발생하는 초월공동의 벽면효과를 포텐셜 유동 기반 경계요소법에 경상법을 적용하여 모사할 수 있음을 보였다. 2차원 쐐기형 몰수체를 대상으로 벽면과의 거리 비에 따라 항력특성과 공동 형상의 변화를 평가하였으며, 기존의 이론 및 실험 연구결과와의 비교를 통해 검증하였다. 동일한 캐비테이션수 조건에서 벽면 효과를 크게 받을수록 몰수체에 작용하는 항력은 감소하는데, 이는 발생하는 공동의 형상이 벽면 효과를 크게 받을수록 항력을 적게 받는 유선형에 가까운 형태로 변하기 때문인 것으로 이해할 수 있다. 또한 벽면 효과는 쐐기형 몰수체의 각도가 작을수록, 그리고 캐비테이션수가 클수록, 즉, 발생한 공동의 길이가 작을수록 더 크게 나타남을 확인하였다.

현재 본 연구팀에서 개발 중인 포텐셜 유동 기반 경계요소법은 3차원 축대칭 형상의 몰수체에서 발생하는 공동유동의 수치해석이 가능하며, 본 연구에서 적용하여 2차원 쐐기형 몰수체를 대상으로 검증한 경상법을 적용하여 추후 벽면효과를 받는 3차원 몰수체의 공동유동에 대한 수치해석이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 원천기술개발사업(NRF-2014M3C1A9060786)과 산업통상자원부의 산업융합원천기술개발사업(10045337)의 지원으로 수행되었다.

References

Ahn, B.K. Lee, C.S. & Kim, H.T., 2010. Experimental and numerical studies on super-cavitating flow of axisymmetric cavitators. *International Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineering*, 2(1), pp.39-44.

Ahn, B.K. Lee, T.K. Kim, H.T. & Lee, C.S., 2012. Experimental investigation of supercavitating flows. *International Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineering*, 4(2), pp.123-131.

Birkhoff, G. Plesset, M. &Simmons, N., 1950. Wall effects in cavity flow. *Quarterly of Applied Mathmatics*, 9(2), pp.151-168.

Birkhoff, G. & Zarantonello, E.H., 1957. *Jets, wakes and cavities*. Academic Press: New York.

Brennen, C., 1969. A numerical solution of axisymmetric cavity flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 37(4), pp.671-688.

Jeong, S.W. & Ahn, B.K., 2016. An experimental study on wake cavity flow characteristics of two-dimensional wedge shaped control fins. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(3), pp.180-187.

Karlikov, V.P. & Sholomovich, G.I., 1966. Method of approximate account for the wall effect in cavitation flow around bodies in water tunnels. *Fluid Dynamics*, 1(4), pp.89-93.

Kim, J.H. Jang, H.G. Ahn, B.K. & Lee, C.S., 2013. A numerical analysis of the supercavitating flow around three-dimensional axisymmetric cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.160-166.

Kim, J.H. Jung, S.W. Ahn, B.K. & Jeon, Y.H., 2016. A study on natural supercavitation and drag characteristics of axisymmetric cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.160-166.

Wu, T.Y. Whitney, A.K. & Brennen, C., 1971. Cavity-flow wall effects and correction rules. *Journal or Fluid Mechanics*, 49(2), pp.223-256.

김 지 혜

안 병 권