

2차원 물수체의 형상 변화에 따른 초월공동 수치해석

박현지·김지혜·안병권†
충남대학교 선박해양공학과

Numerical Analysis of Supercavitation according to Shape Change of the Two-dimensional Submerged Body

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

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.

A cavitator plays an important role to generate the supercavity. Most previous numerical and experimental studies have been focused on the presence of cavitators alone. However, the body behind the cavitator causes a change in the wake flow and hence it affects generation and growth of the supercavity. In this paper, we present a boundary elementary method based on a potential flow analysis, and calculate characteristics of the supercavity formation depending on the change of the body shape of two-dimensional submerged objects. Various parameters such as cone angle of the cavitator, length of the forehead and diameter of the body are considered. The results show that the longer the forepart length, the longer the cavity is created under the same conditions, and also the change in the diameter of the body is the most influential factor on the growth of the supercavity. As a result, we suggest that it is necessary to carefully consider the influence of the body shape during the initial design stage of the supercavitating underwater vehicle.

Keywords : Supercavitation(초월공동), Cavitator(캐비테이터), Potential flow(포텐셜 유동), Boundary element method(경계요소법)

1. 서론

초월공동 현상이 발생하면 수중운동체의 몸체가 유체와 직접적으로 접촉하는 면적이 줄어들고, 이에 따라 마찰 저항이 감소하게 되어 수중에서 이동하는 운동체의 속도가 극적으로 증가하게 된다. 이 같은 이점을 활용하기 위해 초월공동 현상에 대한 실험 및 수치해석 연구가 꾸준히 진행되어왔다. 특히 수중운동체 전면부에 위치한 캐비테이터(cavitator)는 초월공동을 발생시키고 그 형상을 유지시키는 핵심적인 역할을 담당하기 때문에 그동안은 캐비테이터 단독 특성에 대한 이론 및 실험연구가 중점적으로 이루어졌다. 1950년대 후반 초월공동에 대한 개념이 정립되고 공학적 응용성에 관심이 커지면서 관련 기초연구들이 시작되었다. 대표적으로 단순한 캐비테이터 형상에서 발생하는 초월공동의 유체력 특성을 정식화하였으며(Wu, 1956), 2차원 물체를 중심으로 초월공동 현상에 대한 실험 연구를 수행하고 이를 이용해 초월공동의 형상특성에 대한 다양한 경험식들이 제안되었다(Tulin, 1953; Self & Ripken, 1955; Garabedian, 1956; Waid,

1975; Silberman, 1959). 이후 군사적 성격의 연구 특성상 공개가 제한된 연구들이 이어져 오다가 1990년대 말부터 미국, 러시아, 독일을 중심으로 연구결과가 공개되기 시작했으며, 국내에서는 2009년부터 초월공동과 관련된 실험 및 2차원 물체의 초월공동 수치해석(Lee, et al., 2013)과 같은 이론해석 연구들이 시작되었다.

특히 비점성 경계요소법을 이용한 수치해석법의 경우, 복잡한 다상유동 현상을 상대적으로 매우 빠른 시간에 해석이 가능하다. 또한 다양한 형상의 축대칭 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 기하학적 형상과 유체력 특성을 파악할 수 있는 장점이 있어 초월공동 연구에 긴요하게 활용되고 있다. Kim, et al. (2013)은 다양한 형상의 2차원 및 3차원 축대칭 캐비테이터에서 발생하는 초월공동 해석을 수행한바 있으며, 원판형과 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 공동의 기하학적 크기와 항력특성에 대해 캐비테이션터널에서 수행한 모형실험 결과와 비교, 검증하고 유용한 관계식을 도출한 바 있다(Kim, et al., 2016). 그동안의 연구는 캐비테이터 단독 특성에 집중되었으나, 운동체 몸체의 형상 변화에 따른 초월공동 성장 특성을 파악하는 것은 초기 설계 단계에서

수중운동체의 보다 정확한 항력 예측을 위해 필요한 단계이다. 본 연구에서는 이러한 수중운동체의 몸체가 초월공동이 성장하는 데에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위해 기존의 비점성 해석법을 확장하여 몸체의 영향을 고려한 수치해석 방법을 개발하였고, 몸체의 유무 및 형상 변화에 따라 발생하는 초월공동의 특성을 살펴보고자 하였다. 먼저, 몸체 유무에 따른 초월공동 발생특성을 비교하고 몸체 어깨의 형상이 공동 생성에 미치는 영향을 확인하기 위해 몸체 어깨의 유무 및 길이 변화에 따른 계산을 수행하였다. 또한, 몸체의 두께가 공동 형상에 미치는 영향을 확인하였으며 이를 통해 각각의 몸체 형상 파라미터가 초월공동 성장에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배 방정식 및 경계조건

수중운동체를 둘러싸고 있는 유동은 이상유체의 비회전 유동으로 지배방정식은 라플라스 방정식으로 정의한다. 이때 ϕ 는 교란 속도 포텐셜, \underline{V} 는 전체 유동장의 속도, \underline{U}_∞ 는 전체 유동장의 속도 포텐셜, \underline{U}_∞ 는 유입 속도이며 \underline{x} 는 위치 벡터를 의미한다.

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

$$\underline{V} = \nabla \Phi \quad (\Phi = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x} + \phi) \tag{2}$$

본 수치해석에 있어 2차원 축대칭 물수체와 캐비테이터에서 발생된 초월공동은 Fig. 1과 같은 형상으로 표현되며, 여기서 x 축은 유동의 후류방향을 나타낸다. 캐비테이터 영역을 S_T , 몸체 영역을 S_B , 발생한 공동 영역을 S_C 로 나누어 형상을 정의하고, 이때 공동은 캐비테이터의 끝단에서 발생하여 성장한다.



Fig. 1 Coordinate system

유동은 경계면을 침투하지 않고, 유동장의 무한 원방에서는 속도가 교란되지 않는다고 가정하면, 전체 표면에서의 경계조건은 아래의 식 (3)과 (4)로 표현이 가능하다. 이때 \underline{n} 은 경계면에서 유체영역으로 향하는 법선벡터이다.

$$\nabla \Phi \rightarrow \underline{U}_\infty, \text{ at } \underline{x} \rightarrow \infty \tag{3}$$

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

캐비테이터 끝단에서 발생한 초월공동의 형상 함수인 $f(x,y,t)$ 는 다음 식 (5)의 운동학적 경계조건을 만족해야 하며, 초월공동 내부의 압력 p 는 유체 증기압 p_v 와 같다는 동력학적 경계조건을 만족해야 한다.

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

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

또한 식 (7)과 같이 공동마감조건을 두어 발생한 초월공동을 유한한 길이로 정의한다.

$$t^c(\underline{x}_{T,E}) = 0 \tag{7}$$

여기서 t^c 는 발생한 초월공동의 두께이며 $\underline{x}_{T,E}$ 는 초월공동이 마감되는 끝단의 위치를 의미한다.

2.2 적분 방정식

경계면으로 둘러싸인 무한 유체 영역에서 지배방정식을 충족하는 속도 포텐셜은 다음과 같은 Green정리로 표현된다.

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

위의 적분방정식 (8)을 경계치 문제의 해석을 위해 경계면에 다이폴(dipole)과 소스(source)를 분포하여 다시 정리하면 다음 식 (9)로 정리할 수 있다. 다이폴은 경계면 전체에 걸쳐 분포하고 소스는 공동의 표면에 분포하여 공동 두께의 영향을 표현하게 된다.

$$\begin{aligned} \Phi_i^- = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x} + \int_{S_T \cup S_B \cup S_C} \mu(x) \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ + \int_{S_C} q(x) G dS \end{aligned} \tag{9}$$

$$G = \frac{\ln r}{2\pi} \tag{10}$$

이때 μ 는 다이폴의 세기, q 는 소스의 세기, r 은 제어점으로부터 특이점까지의 거리이며 G 는 Green함수이다. 동력학적 경계조건인 식 (6)은 공동 표면에서의 접선속도가 일정하다는 조건으로 표현이 가능하다. 베르누이 방정식을 사용하여 이를 다시 정리하면 다음 식 (11)과 (12)처럼 표현할 수 있으며, 여기서 σ 는 캐비테이션수, C_p 는 압력계수, \underline{V} 는 공동 표면에서의 접선방향 속도 벡터이다.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = -C_p = \left(\frac{|V_t|}{|U_\infty|} \right)^2 - 1 \quad (11)$$

$$|V_t| = const. \quad (12)$$

속도 포텐셜의 정의에 의해 전체 속도 포텐셜은 다음 식 (13)로 나타낼 수 있으며, 이때 $x_{C.T.E}$ 는 캐비테이터의 끝단이다.

$$\Phi(x) = \Phi(x_{C.T.E}) + \int_0^s ds \quad (13)$$

다이폴은 다음 식 (14)와 같이 정리되므로 캐비테이터 끝단에서의 속도 포텐셜과 공동 표면에서의 접선 속도를 알면 초월 공동 표면에서의 다이폴의 세기를 계산할 수 있게 된다. 이때 다이폴의 세기는 경계면 내부의 유동과 경계면 외부의 유동의 속도 포텐셜 차이이다.

$$\mu(x) = \phi^-(x) - \phi(x) = -\phi(x) \quad (14)$$

본 연구에서는 주어진 캐비테이션수를 만족하는 공동의 형상을 구하는 대신, 특정 공동 길이를 만족하는 공동의 두께와 캐비테이션수를 반복적으로 계산하여 구하는 방법을 사용하였다. 즉, 공동 내부의 압력을 계산하지 않고 특정 공동 길이를 입력하여 생성된 공동 표면의 접선속도를 구함으로써 공동 표면의 압력을 구하게 된다.

2.3 적분방정식의 이산화

적분방정식 (9)를 이산화하여 정리하면 / 번째 패널에서의 전체 속도 포텐셜은 다음 식(15)와 같이 표현된다.

$$0 = \Phi_i^- = U_\infty \cdot x_i + \sum_{j=0}^{N^A-1} \mu_j D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^C-1} q_k S_{ik} \quad (15)$$

이때 N^A , N^B , N^C 는 각각 캐비테이터, 몸체, 공동 표면에 분포된 패널의 개수를 나타내며, 해석에 이용되는 전체 패널 개수는 $N^A=N^A+N^B+N^C$ 이다. 또한 공동 표면에서의 다이폴 세기를 구하는 식은 식 (16)와 같이 표현이 가능하다.

$$-\mu_{C.T.E} + \mu_j + \underline{V}_t \cdot g_j = 0 \quad (16)$$

$$g_j = \sum_{k=N^T}^j s_k \quad (17)$$

여기서 g_j 는 캐비테이터 끝단에서 j 번째 공동 표면 패널까지의

공동 길이를 나타내며, 이때 s_k 는 k 번째 패널의 길이이다. 또한 공동 마감조건을 이산화하면 다음의 식 (18)로 표현할 수 있다.

$$\sum_{j=N^M}^{N^A-1} q_{j-N^M} \Delta s_j = 0 \quad (18)$$

여기서 $N^M=N^A+N^B$ 이다. / 번째 패널의 다이폴 세기가 j 번째 패널에 영향을 미쳐 유기되는 속도 포텐셜을 D_{ij} , / 번째 패널의 소스 세기가 k 번째 패널에 영향을 미쳐 유기되는 속도 포텐셜을 S_{ik} 라고 할 때, 이산화된 적분방정식 식 (15)는 식 (16)를 적용하여 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$0 = \Phi_i^- = U_\infty \cdot x_i + \sum_{j=0}^{N^M-1} \mu_j D_{ij} + \sum_{j=N^M}^{N^A-1} (\mu_{C.T.E} - \underline{V}_t \cdot g_j) D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^C-1} q_k S_{ik} \quad (19)$$

위 식 (19)의 이산화된 적분방정식은 Fig. 2와 같은 형태의 대수 방정식으로 정리할 수 있으며, 미지수는 다이폴 및 소스의 세기 그리고 공동 표면에서의 접선 속도벡터이다.

$$\begin{bmatrix} D_1 & D_2 & S & D_3 \\ 0 & 0 & c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \end{bmatrix}$$

Fig. 2 Algebraic form of the discretized integral equation

여기서 계수 행렬의 D_{1j} 와 D_{2j} , D_{3j} 는 다이폴에 의해 유기되는 포텐셜, S_{k} 는 소스에 의해 유기되는 포텐셜, c 는 공동마감조건, x 는 다이폴의 세기와 소스의 세기 및 접선 벡터, b 는 유입속도벡터이며 각각 다음 식 (20)~(26)로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} D_{0,0} & \cdots & D_{0,N^T-1} + \sum_{j=N^M}^{N^A-1} D_{0,j} \\ \vdots & & \vdots \\ D_{N^A-1,0} & \cdots & D_{N^A-1,N^T-1} + \sum_{j=N^M}^{N^A-1} D_{N^A-1,j} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} D_{0,N^T} & \cdots & D_{0,N^M-1} \\ \vdots & & \vdots \\ D_{N^A-1,N^T} & \cdots & D_{N^A-1,N^M-1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=N^M}^{N^A-1} g_j \cdot D_{0,j} \\ \vdots \\ \sum_{j=N^M}^{N^A-1} g_j \cdot D_{N^A-1,j} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} S_{0,0} & \cdots & S_{0,N^C-1} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{N^A-1,0} & \cdots & S_{N^A-1,N^C-1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[s_0 \quad \cdots \quad s_{N^C-1}] \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \mu_0 \\ \vdots \\ \mu_{N^M-1} \\ q_0 \\ \vdots \\ q_{N^C-1} \\ \underline{V}_t \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_0 \\ \vdots \\ \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_{N^A-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

3. 해석 결과

3.1 몸체 형상 변수 및 해석 성능 평가

본 수치해석에서는 Fig. 3과 같이 형상 특성을 구분할 수 있는 축 대칭형 물수체를 기준으로, 캐비테이터의 각도 변화, 몸체의 유무, 몸체 어깨의 길이 및 몸체의 직경 변화에 따라 발생하는 초월공동의 특성을 평가하고자 하였다. Table 1은 각 형상 기호에 대한 설명이다.

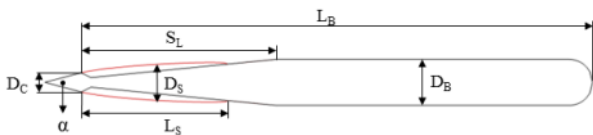


Fig. 3 Configuration of the calculation model

앞선 정식화 과정에서 설명한 바와 같이, 본 해석법은 주어진 초월공동 길이를 만족하는 캐비테이션수를 반복 계산을 통해 찾아내고, 수렴된 조건에서 공동의 최대 두께를 계산하는 방법을 사용한다. 물수체의 다양한 형상변화에 대한 자세한 결과 분석에

앞서, Fig. 4는 본 해석법을 통해 계산된 대표적인 예로 $\alpha=30^\circ$, $D_B/D_C=2.0$, $L_B/D_C=25.0$, $S_L/D_C=10.0$ 인 물수체에서 발생한 공동 ($L_S/D_C=10.0$)의 형상과 물체 및 공동 표면의 압력계수와 유속 분포를 보여준다. 캐비테이터 앞날 부분에서 속도가 급격히 증가함에 따라 압력강하가 발생하며, 캐비테이터 끝단에서 생성된 공동 표면에서의 압력은 유체의 증기압으로 일정하기 때문에 접선속도 또한 일정한 값을 유지한다. 또한 공동이 마감되는 지점에서부터 유속이 증가하면서 나타나는 압력계수의 변화 특성도 확인할 수 있다. Table 2는 Fig. 4의 해석 과정에서 계산된 캐비테이션수(σ)의 근사 백분율 상대오차, 즉 식 (27)에 대한 수렴 특성을 보여준다.

$$e_i = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\sigma_i} \times 100\% \quad (27)$$

Table 1 Representation of the geometric symbol

Symbol	Representation
α	Cavitator wedge-angle
D_C	Cavitator diameter
D_B	Body diameter
L_B	Body length
S_L	Shoulder length
D_S	Cavity maximum diameter
L_S	Cavity length

계산이 반복됨에 따라 오차가 급격히 감소하며 5번 이내의 반복 계산만으로도 0.001%에 가까운 매우 작은 오차율로 수렴한다.

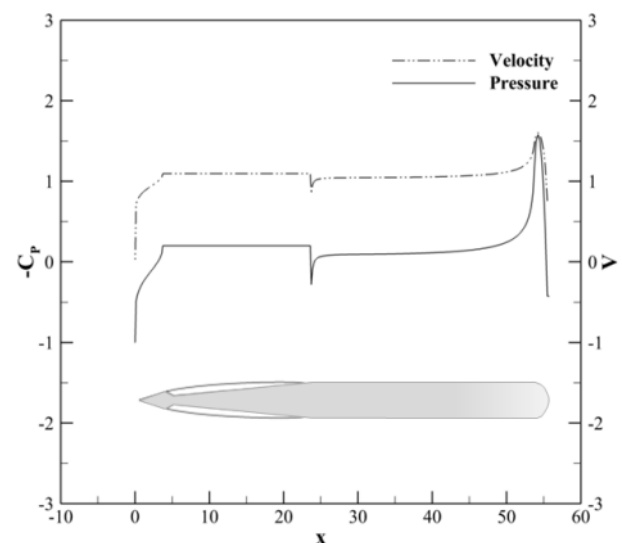


Fig. 4 Typical results of the present method

Table 2 Approximate relative error and convergence

Iteration number	Approximate relative error (%)	Cavitation number (σ)
1	7.1948	0.1166
2	0.4576	0.2024
3	0.1439	0.2013
4	0.0013	0.2021

3.2 캐비테이터 형상 및 몸체의 유무에 따른 초월공동 특성

먼저, 서로 다른 각(α)을 갖는 캐비테이터 후방에 몸체의 유무에 따른 초월공동의 성장 특성을 평가하기 위해 Table 3과 같은 $L_B/D_C=25.0$ 인 몸체의 유무에 따른 초월공동 특성에 대해 계산을 수행하였다.

Table 3 Calculation case (1)

D_B/D_C	S_L/D_C	calculation model
cavitator only	◀	
1.0	0	◀

Fig. 5는 캐비테이터 각도가 30°, 60°, 90°, 120°, 180°인 경우에 대한 해석 결과로, 발생한 공동의 길이를 캐비테이터 직경으로 무차원하여 나타내었다. 먼저 초월공동의 일반적인 특성으로 캐비테이션수가 작아짐에 따라 공동의 길이는 증가하며, 캐비테이터 각도가 클수록 동일 캐비테이션수에서 긴 공동이 발생함을 알 수 있다. 그러나 동일한 각도 조건에서 몸체가 있을 때에는 몸체가 없을 때보다 더 짧은 길이의 공동이 생성되며, 생성된 공동의 길이가 길어질수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 몸체가 초월공동의 초기 성장을 지연시키는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 몸체가 있는 경우 몸체가 없는 단독 캐비테이터에서와 동일한 길이의 공동을 생성시키기 위해서는 더 낮은 캐비테이션수 조건이 요구된다고 할 수 있다. 이러한 특성은 캐비테이터의 각도와는 상관없이 일정하게 나타나는 것을 확인하였으며, 캐비테이터의 각도가 30°와 180° 각도일 때 몸체 유무에 따라 생성되는 동일한 공동 길이에서의 캐비테이션수 차이 값을 Table 4에 나타내었다. Fig. 6은 몸체의 유무에 따라 생성된 공동의 최대 두께를 캐비테이터의 직경으로 무차원하여 나타낸 결과이다. 앞선 길이 변화의 비율 보다는 작지만, 몸체가 있는 경우 동일한 캐비테이션수에서 발생하는 공동의 최대 두께는 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 몸체에 의해 발생하는 공동의 길이 및 최대 두께 특성이 달라진다는 것을 알 수 있으며, 특히 공동 길이에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

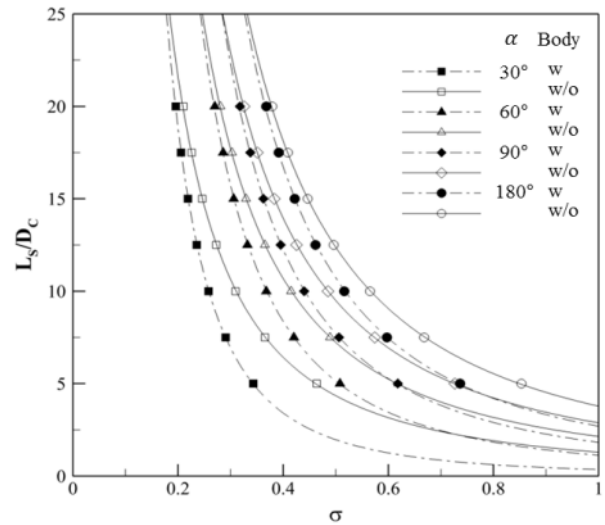


Fig. 5 Non-dimensional cavity length versus cavitation number w/ and w/o body

Table 4 A gap between cavitation number for the same cavity length

L_S/D_C	$\Delta\sigma$	
	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=180^\circ$
5.0	0.12	0.12
10.0	0.05	0.05
15.0	0.03	0.03
20.0	0.01	0.01

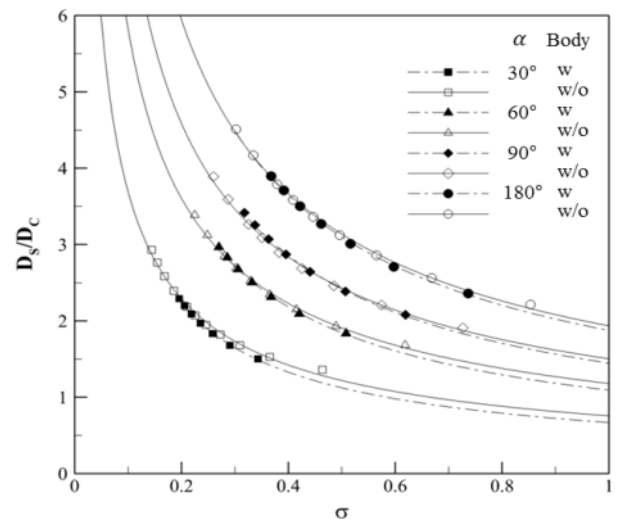





Fig. 6 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number w/ and w/o body

3.3 몸체 어깨 길이 변화 따른 초월공동 특성

다음으로 몸체의 어깨 형상이 공동의 성장에 미치는 영향을

평가하기 위해 Table 5와 같이 S_L/D_C 의 비율이 서로 다른 세 종류의 물수체에 대해 해석을 수행하였다. 이때 캐비테이터 각도 30° 와 180° 인 경우에 대해 몸체의 길이는 $L_B/D_C=25.0$ 으로 고정하였다.

Table 5 Calculation case (2)

D_B/D_C	S_L/D_C	Calculation model
1.0	0	
1.0	5.0	
1.0	10.0	

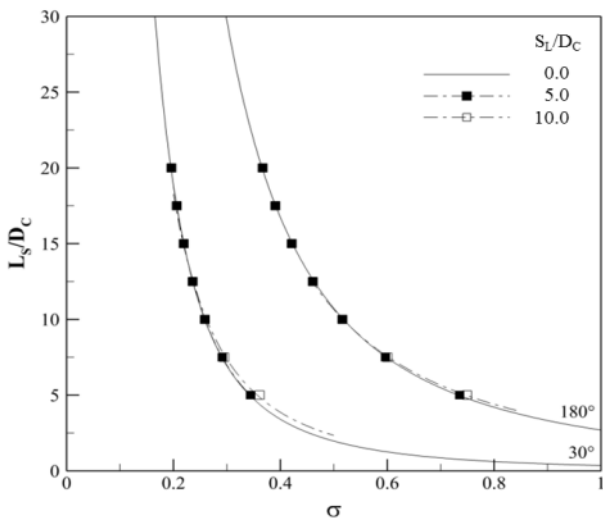


Fig. 7 Non-dimensional cavity length versus cavitation number according to shoulder length

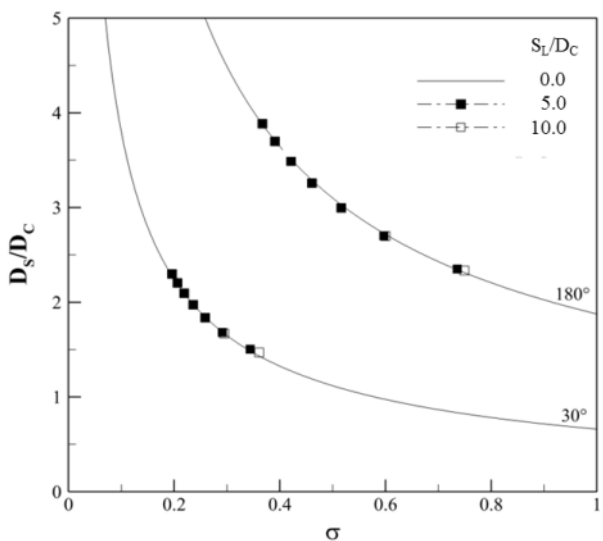


Fig. 8 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number according to shoulder length

Fig. 7은 몸체 어깨의 길이 변화에 따라 생성된 공동의 길이를

비교하여 나타낸 결과로, 캐비테이터 각도가 30° 와 180° 인 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 캐비테이터의 각도와 상관없이 생성된 공동의 길이가 캐비테이터 직경의 10배 이상으로 성장했을 때에는 공동이 몸체의 어깨를 전부 덮게 된다. 성장한 공동의 길이가 몸체 어깨의 길이보다 더 길 때($L_S/D_C > 10$)에는 몸체의 어깨 형상이 공동에 영향을 미치지 않기 때문에, 어깨의 유무 또는 길이 차이에 따라 발생한 공동의 형상이 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 공동의 길이가 몸체의 어깨 길이보다 짧을 때($L_S/D_C < 10$)에는 어깨가 존재하는 몸체가 존재하지 않는 몸체보다, 그리고 어깨의 길이가 긴 몸체가 짧은 몸체보다 동일한 캐비테이션수에서 더 긴 공동을 생성함을 확인할 수 있다. 이를 통해 몸체 어깨의 존재는 공동 생성을 촉진시키며, 어깨의 길이가 길수록, 즉 기울기가 작을수록 공동이 더 빠르게 성장함을 알 수 있다. Fig. 8은 몸체 어깨의 길이 변화에 따라 생성된 공동의 최대 두께를 캐비테이터의 직경으로 무차원하여 나타낸 해석 결과이다. 어깨 형상의 차이가 공동의 최대 두께에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가할 수 있다.

3.4 몸체의 직경 변화 따른 초월공동 특성

다음으로 몸체의 직경이 공동의 성장에 미치는 영향을 평가하기 위해 Table 6과 같이 S_L/D_C 의 비율을 고정시키고 서로 다른 네 종류의 몸체 직경 변화에 대해 해석을 수행하였다. 이전 계산과 동일하게 캐비테이터 각도 30° 와 180° 인 경우에 대해 몸체의 길이는 $L_B/D_C=25.0$ 으로 고정하였다. Fig. 9는 몸체의 직경 변화에 따라 발생하는 공동의 길이를 캐비테이터의 직경으로 무차원하여 나타낸 결과이다. 직경이 클수록 동일한 캐비테이션수에서 더 짧은 길이의 공동이 생성됨을 확인할 수 있으며, 이는 몸체의 직경이 클수록 공동의 발생이 지연됨을 의미한다. 또한 생성된 공동의 길이가 길어질수록, 즉 초월공동에 가까워질수록 그 영향이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 6 Calculation case (3)




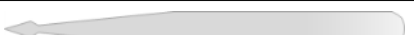
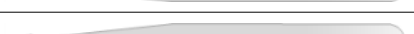
D_B/D_C	S_L/D_C	Calculation model
cavitator only		
1.0	10.0	
2.0	10.0	
2.2	10.0	
2.4	10.0	

Fig. 10은 몸체의 직경 변화에 따라 생성된 공동의 최대 두께를 캐비테이터의 직경으로 무차원하여 나타낸 결과이다. 이를 통해 동일한 캐비테이션수에서 발생하는 공동의 최대 두께는 몸체의 직경이 커질수록 작아짐을 확인할 수 있다. 계산 결과에 따르면 몸체의 직경 변화는 몸체의 다른 형상 변화에 비하여 발생한

공동 형상, 특히 공동의 길이에 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있으며, 따라서 초기 형상 설계 시 몸체의 직경에 대한 충분한 고려가 필요함을 시사한다. 이를 면밀하게 확인하고자 동일한 캐비테이션수에서 조건($\sigma=0.37$)에서, 즉 물수체의 이동 속도가 동일할 때 몸체의 직경 변화에 따라 발생하는 공동의 형상 특성을 비교하였다. 이때 $S_L/D_C=10.0$, $L_B/D_C=25.0$ 으로 고정된다.

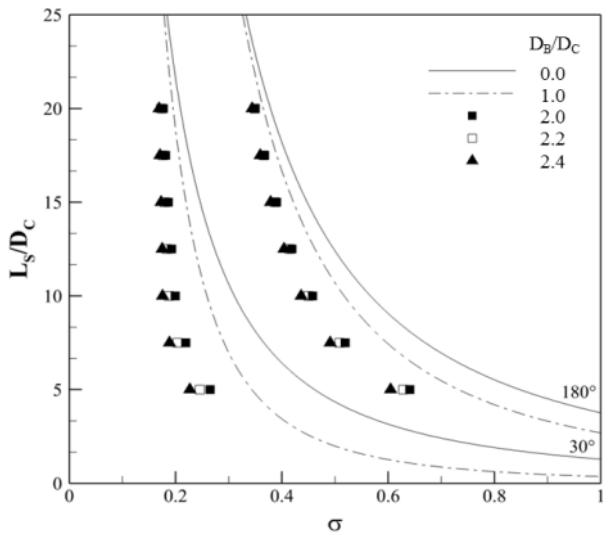


Fig. 9 Non-dimensional cavity length versus cavitation number according to body diameter

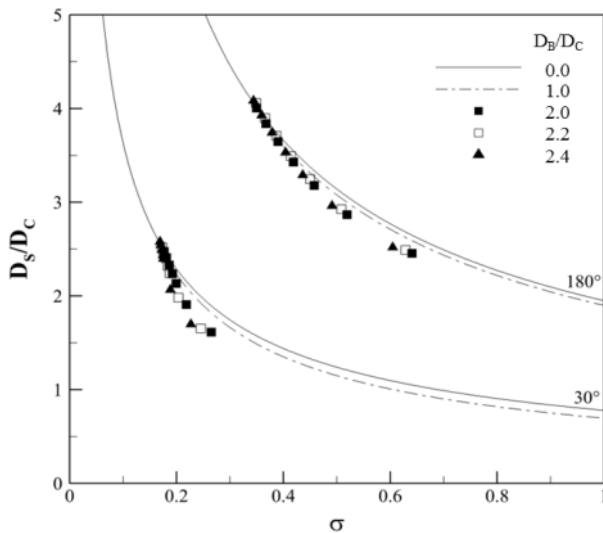


Fig. 10 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number according to body diameter

Table 8은 캐비테이터의 각도가 90°이고 전두부의 길이가 캐비테이터 직경의 10배, 그리고 캐비테이션수가 0.37로 동일한 경우, 몸체의 직경이 변함에 따라 생성된 공동의 길이 및 공동의 최대 두께를 비교한 결과이다. 앞선 결과에서 확인하였듯이 동일한 캐비테이션수에서 몸체의 직경이 클수록 더 짧고 얇은 두께의

공동이 생성됨을 다시 한 번 확인할 수 있다. 이 때 각각에 해당하는 몸체와 계산된 공동의 형상을 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Predicted cavity shapes according to different body diameters ($\alpha=90^\circ$, $\sigma=0.37$)

D_B/D_C	S_L/D_C	Analysis result
cavitator only		
1.0	10.0	
2.0		
2.2		
2.4		

Table 8 Predicted cavity shapes according to different body diameters ($\alpha=90^\circ$, $\sigma=0.37$)

D_B/D_C	S_L/D_C	L_S/D_C	D_S/D_C
Cavitator only		15.0	3.0
1.0	10.0	14.6	3.0
2.0		11.1	3.0
2.2		10.0	2.9
2.4		9.3	2.9

Table 9 Predicted cavity shapes according to different body diameters ($\alpha=180^\circ$, $\sigma=0.37$)

D_B/D_C	S_L/D_C	Analysis result
Cavitator only		
1.0	10.0	
2.0		
2.2		
2.4		

Table 10은 캐비테이터의 각도가 180°이고 몸체 어깨의 길이가 캐비테이터 직경의 10배, 그리고 캐비테이션수가 0.37로 동일한 경우, 몸체의 직경에 따라 생성된 공동의 길이 및 최대 두께를 비교한 결과이다. 이 때 각각에 해당하는 몸체와 계산된 공

동의 형상을 Table 9에 나타내었다. 캐비테이터 각도 90°와 180°의 결과를 비교해보면, 동일한 조건에서 캐비테이터 각도가 180°인 경우 발생하는 공동의 길이와 최대 폭이 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 이는 동일한 속도 조건에서 발생하는 공동의 부피가 큼을 의미한다. 때문에 캐비테이터 각도가 180°인 경우가 캐비테이터 각도 90°인 경우에 비하여 동일한 조건에서 공동 내부의 여유 공간이 충분히 확보되며, 이는 수중운동체가 상하 또는 좌우로 이동할 경우 초월공동 안정성 측면에도 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 수중운동체의 몸체와 공동 사이의 상관관계를 설계 초기 단계에서 반드시 고려할 필요가 있음을 확인하였다.

Table 10 Predicted cavity shapes according to different body diameters ($\alpha=180^\circ$, $\sigma=0.37$)

D_B/D_C	S_L/D_C	L_s/D_C	D_s/D_C
Cavitator only		20.9	3.9
1.0	10.0	19.8	3.9
2.0		17.4	3.9
2.2		17.1	3.9
2.4		15.5	3.7

4. 결론

캐비테이터는 초월공동을 발생시키고 이를 유지시키는 가장 중요한 역할을 한다. 대부분의 이전 연구들에서는 캐비테이터가 단독으로 있는 경우에 대한 공동유동 해석과 관련 실험 연구들이 수행되었다. 그러나 운동체의 몸체는 캐비테이터 후류 유동장의 변화를 야기하기 때문에 공동의 발생과 성장 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것은 초월공동 수중운동체 설계에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에, 본 연구에서는 비점성 유동 해석에 기초한 경계요소법을 적용하여 2차원 물수체의 몸체 형상변화에 따라 달라지는 초월공동의 발생 특성을 수치적으로 해석하였다. 물수체의 형상 파라미터 중 캐비테이터의 원뿔 각도, 몸체 어깨의 길이, 몸체의 직경의 변화를 고려하였다. 먼저 캐비테이터의 형상과 몸체의 유무에 따른 초월공동 특성을 평가한 결과 몸체가 있는 경우 단독 캐비테이터와 비교하여 동일한 속도 조건에서 더 짧은 공동이 발생함을 확인하였다. 또한 몸체 어깨의 길이가 길수록 동일한 속도 조건에서 더 긴 공동을 생성시키며, 공동의 길이가 어깨보다 길 때에는 영향이 없음을 확인하였다.

특히 몸체의 직경 변화는 공동의 성장에 가장 큰 영향을 미치는데, 이는 몸체의 직경이 클수록 캐비테이터 후류 유동장의 압력이 상승하고, 이로 인해 공동 성장이 지연되는 효과가 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 초월공동의 형상 특성은 캐비테이터의 형상, 즉 각도와 직경에 따라 결정되지만, 초기 생성과 발달 과정은 몸체의 형상, 특히 직경 변화에 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 따라서 초월공동 수중운동체의 초기 설계단계에서 몸체 형상이 공동 성장에 미치는 영향을 충분히 고려할 필요가 있다고 하겠다.

후기

본 연구는 한국연구재단 원천기술개발사업(NRF-2014M3C1A9060786), 상업융합원천기술개발사업(10045337)과 산업핵심기술개발사업(10062293)의 지원으로 수행되었다.

References

Garabedian, P.R., 1956. Calculation of axially symmetric cavities and jets. *Pacific Journal of Mathematics*, 6(4), pp.611-684.

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. Jeong, 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*, 53(6), pp.465-472.

Lee, H.B. Choi, J.K. & Kim, H.T., 2013. Numerical analysis of supercavitating flows of two-dimensional simple bodies. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.436-449.

Self, M.W. & Ripken, J.F., 1955. *Steady-state cavity studies in a free-jet water tunnel*. Washington D.C.: St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Report No.47.

Silberman, E., 1959. Experimental studies of supercavitating flow about simple two-dimensional bodies in a jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 5(3), pp.337-354.

Tulin, M., 1953. *Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies*. Navy Dept.: Washington D.C.

Waid, R.L., 1957. *Water tunnel investigation of two-dimensional cavities*. California: The Hydrodynamics Laboratory of California Institute of Technology, Report No. E-73.6.

Wu, T.Y., 1956. A free streamline theory for two-dimensional fully cavitated hydrofoils. *Journal of Mathematics and Physics*, 35, pp.403-442.

