

축대칭 수중 운동체의 형상 변화를 고려한 초월공동 수치해석

박현지·김지혜·안병권†
충남대학교 선박해양공학과

Numerical Analysis of Axisymmetric Supercavitating Underwater Vehicle with the Variation of Shape Parameters

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.

Most of the numerical and experimental studies on supercavitating flows are focused on the cavitator only. However, the partial cavity growing into the supercavity is affected by the shape of the body placed behind the cavitator. In this paper, we develop a numerical method which is based on the boundary element method to predict supercavitating flow around three-dimensional axisymmetric bodies. We estimate the influence of the body shape on the supercavity growth. Here, we consider various parameters of the body such as cavitator shape, shoulder length and body diameter, and compare the results with the case of the cavitator only. In summary, it is found that the body may impede the cavity growth, the shoulder mainly affects the cavity length, and the supercavity occurring in the cone type cavitator is strongly influenced rather than that of the disk type cavitator.

Keywords : Underwater vehicle(수중 운동체), Cavitator(캐비테이터), Supercavitation(초월공동), Boundary element method(경계요소법)

1. 서론

수중 운동체가 빠르게 주행하면서 생성된 공동이 운동체를 전부 덮게 되면 운동체는 유체가 아닌 공동(cavitation)에 둘러싸이게 되고, 이때 운동체 표면에 작용하는 마찰 저항이 감소함으로써 상대적으로 빠른 속도로 주행이 가능하게 된다. 이와 같은 현상을 초월공동(supercavitation)이라 칭하며, 결과적으로 초월공동에 뒤덮인 운동체는 일반적인 수중 운동체 대비 동일 추력으로 고속 주행이 가능하기 때문에 해당 장점을 극대화하기 위한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 특히 운동체 전면에 위치한 캐비테이터(cavitator)는 초월공동의 생성 및 성장을 촉진시키므로 이러한 캐비테이터의 형상 설계에 따른 초월공동의 수치 및 실험적 연구가 1950년대 후반부터 꾸준히 진행되어 왔으며(Tulin, 1953; Garabedian, 1956; Wu, 1956; Waid and Lindberg, 1957), 1990년대 말부터는 독일, 러시아, 미국 등을 중심으로 한 군사적 성격을 갖는 연구결과도 공개되기 시작했다. 국내에서는 2000대에 들면서

초월공동과 관련된 실험 및 이론해석 연구(Ahn et al., 2010; Jeong & Ahn, 2016; Kim and Ahn, 2018)가 활발히 수행되고 있으며, 그 중에서도 특히 비점성 경계요소법을 이용한 수치해석법은 짧은 시간 내에 다양한 캐비테이터 형상에서 발생하는 초월공동의 유체력 특성을 파악할 수 있어 유용하게 활용되고 있다. Kim et al.(2013)은 경계요소법을 활용하여 축대칭 캐비테이터에 발생하는 초월공동 특성을 해석하였고, 이후 원판형 및 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 형상 및 항력 특성을 캐비테이션터널에서 수행한 모형실험 결과와 비교 검증하였다(Kim et al., 2016).

앞서 언급된 연구들이 캐비테이터 단독 특성을 중심으로 평가되어왔다면, 본 연구에서는 캐비테이터 후류에 존재하는 몸체가 초월공동이 성장하는데 미치는 영향을 파악하고 수중 운동체의 초기 설계 단계에서 운동체 몸체가 미치는 항력 특성을 평가하고자 한다. 관련 연구로 몸체 형상을 고려한 초월공동의 특성 실험(Rouse and McNowen, 1948)과 경계요소법을 활용한 수치해석 연구(Varghese et al., 2005)가 수행된 바 있다. 본 연구팀에서도 2차원 수중 운동체의 형상 변화에 따른

초월공동 수치해석법을 개발한 바 있으며(Park et al., 2018), 본 논문에서는 이를 확장해 3차원 수중 운동체에서 발생하는 초월공동 형상 및 항력 특성을 평가하고자 한다. 이를 위해 먼저 몸체와 몸체 어깨 유무 및 길이에 따른 공동 형상 특성을 분석하고, 몸체 직경이 공동 형상에 미치는 영향과 항력 특성을 확인하여 각 몸체 형상 파라미터에 따른 초월공동의 성장 특성을 파악하고자 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배 방정식 및 경계조건

Fig. 1은 해석에 사용된 축대칭 운동체와 이에 대한 좌표계를 나타낸다. 여기서 S^T 는 캐비테이터, S^B 는 몸체, 그리고 S^C 는 공동 표면을 의미한다.

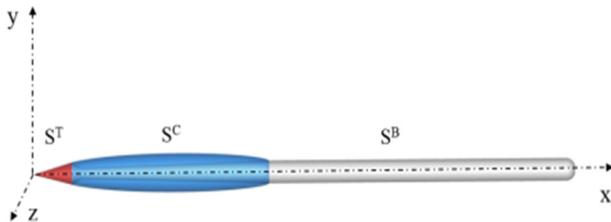


Fig. 1 Coordinate system

유동장 지배방정식은 다음 식 (1)의 라플라스 방정식이며, 적용된 경계조건은 다음 식 (2)~(6)과 같다.

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

$$\text{비침투 조건: } \hat{n} \cdot \underline{V} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \tag{2}$$

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

$$\text{운동학적 경계조건: } \frac{Df(x,y,t)}{Dt} = 0 \tag{4}$$

$$\text{동역학적 경계조건: } p = p_v \tag{5}$$

$$\text{공동 마감조건: } t^c(x_{T.E}) = 0 \tag{6}$$

이때 ϕ 는 교란 속도 포텐셜, \hat{n} 는 경계면에서 유체영역으로 향하는 법선벡터, Φ 는 전체 유동장 속도 포텐셜, \underline{V} 는 전체 유동장 속도, \underline{U}_∞ 는 유입 속도이며, \underline{x} 는 위치 벡터이다. 또한 $f(x,y,t)$ 는 생성된 공동의 형상 함수, p 는 공동 내부압력, p_v 는 유체 증기압, t^c 는 공동 두께이고, $x_{T.E}$ 는 공동이 마감되는 끝단의 위치벡터이다.

2.2 적분 방정식

경계면으로 둘러싸인 유동 영역에서 라플라스 방정식을 충족하는 속도 포텐셜은 Green 정리를 만족하며, 경계면에 다이폴(dipole)과 소스(source)를 분포하면 다음 식 (7)로 정리할 수 있는데, 이때 다이폴은 경계면 전체에 분포하고 소스는 공동 표면에만 분포시켜 공동 형상 변화량으로 사용하게 된다. μ 는 다이폴 세기, q 는 소스 세기, G 는 Green 함수이며, r 는 제어점에서 특이점까지의 거리이다.

$$\Phi_i^- = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x} + \int_{S_T \cup S_B \cup S_C} \mu(x) \frac{\partial G}{\partial n} dS + \int_{S_C} q(x) G dS \tag{7}$$

동역학적 경계조건인 식 (5)는 공동 표면에서 접선방향 속도 벡터(\underline{V}) 크기가 일정하다는 조건으로 표현이 가능하며, 이를 통해 전체 속도 포텐셜은 식 (8)로 나타낼 수 있다. 여기서 $x_{C.T.E}$ 는 캐비테이터 끝단 위치벡터이다.

$$\Phi(\underline{x}) = \Phi(x_{C.T.E}) + \underline{V}_t \int_0^s ds \tag{8}$$

2.3 적분방정식의 이산화

적분 방정식 (7)을 이산화하면 식 (9)와 같이 N^T 개의 패널에 유리되는 전체 속도 포텐셜을 구할 수 있다.

$$0 = \Phi_i^- = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_i + \sum_{j=0}^{N^A-1} \mu_j D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^C-1} q_k S_{ik} \tag{9}$$

여기서 N^T 는 캐비테이터 표면에 분포된 패널 개수, N^B 는 몸체 표면에 분포된 패널 개수, N^C 는 공동 표면에 분포된 패널 개수, N^R 는 회전방향으로 분포된 패널 개수이다(Fig. 2).

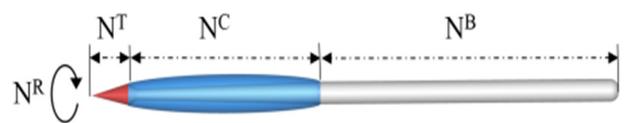


Fig. 2 Panel distribution

이때 전체 패널 개수는 $N^A = N^T + N^B + N^C$ 이고, 다이폴 세기는 경계면을 기준으로 내부 유동과 외부 유동의 속도 포텐셜 차이이므로 공동 표면에 분포된 다이폴 세기를 구하는 식 (8)은 식 (10)으로 이산화할 수 있다.

$$-\mu_{C.T.E} + \mu_j + \underline{V}_t \cdot \underline{g}_j = 0 \tag{10}$$

$$\underline{g}_j = \sum_{k=0}^{N^T} \Delta s_k \tag{11}$$

g 는 캐비테이터 끝단 패널에서 r 번째 공동 표면 패널까지의 길이를 나타내며, 이때 s 는 k 번째 패널 길이를 의미한다. 공동 마감조건과 식 (11)을 다시 정리하면 아래의 식 (12)와 같다. 이때 $N^M=N^T+N^B$ 이다.

$$\sum_{j=N^M}^{N^A-1} q_{j-N^M} \Delta s_j = 0 \quad (12)$$

전체 속도 포텐셜을 구하는 식 (9)에 식 (10)을 대입하면 식 (13)과 같이 이산화된 적분 방정식으로 표현된다. 해당 식은 Fig. 3에 나타난 대수방정식으로 표현이 가능하며, 이때 미지수는 다이폴과 소스의 세기, 그리고 공동 표면에서의 접선방향 속도벡터이다. 계수 행렬인 Fig. 3에서 D_{1ij} , D_{2ij} , D_{3ij} 는 다이폴에 의해 유기되는 속도 포텐셜, S_{ik} 는 소스에 의해 유기되는 속도 포텐셜, c 는 공동마감조건, x 는 다이폴과 소스의 세기 및 공동 표면에서의 접선방향 속도벡터, b 는 유입속도 벡터를 의미한다.

$$0 = \Phi_i^- = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_i + \sum_{j=0}^{N^M-1} \mu_j D_{ij} + \sum_{j=N^M}^{N^A-1} (\mu_{C.T.E} - V_t \cdot g_j) D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^C-1} q_k S_{ik} \quad (13)$$

3차원 축대칭 수치해석은 회전방향으로 분포된 다이폴과 소스의 세기가 모두 동일하다고 가정하며, 식 (13)의 적분 방정식은 Fig. 3과 같은 형태의 대수 방정식으로 정리할 수 있다. 여기서 각각의 기호는 D_1 , D_2 , D_3 , S , c 의 차례대로 식 (14)~(20)을 의미한다.

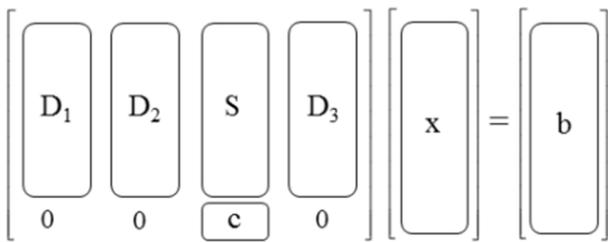


Fig. 3 Algebraic form of the discretized integral equation

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N^R-1} D_{0,0,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} (D_{0,N^T-1,k} + \sum_{j=N^M}^{N^A-1} D_{0,j,k}) \\ \vdots & & \vdots \\ \sum_{k=0}^{N^R-1} D_{N^A-1,0,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} (D_{N^A-1,N^T-1,k} + \sum_{j=N^M}^{N^A-1} D_{N^A-1,j,k}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N^R-1} D_{0,N^T,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} D_{0,N^M-1,k} \\ \vdots & & \vdots \\ \sum_{k=0}^{N^R-1} D_{N^A-1,N^T,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} D_{N^A-1,N^M-1,k} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N^R-1} (\sum_{j=N^M}^{N^A-1} g_j \cdot D_{0,j,k}) \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^{N^R-1} (\sum_{j=N^M}^{N^A-1} g_j \cdot D_{N^A-1,j,k}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N^R-1} S_{0,0,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} S_{0,N^C-1,k} \\ \vdots & & \vdots \\ \sum_{k=0}^{N^R-1} S_{N^A-1,0,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} S_{N^A-1,N^C-1,k} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N^R-1} s_{0,k} & \cdots & \sum_{k=0}^{N^R-1} s_{N^C-1,k} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \mu_0 \\ \vdots \\ \mu_{N^M-1} \\ q_0 \\ \vdots \\ q_{N^C-1} \\ \underline{V}_t \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_0 \\ \vdots \\ \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_{N^A-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3. 해석 결과

3.1 몸체 형상 변수 및 해석 성능 평가

본 수치해석에서는 3차원 축대칭 물수체 형상 변화에 따른 초월공동 특성을 파악하고자 하였으며, Fig. 4에 나타난 3차원 축대칭 수중 운동체를 기준으로 각 몸체 형상 파라미터 변화에 의한 수치해석 결과를 비교하였다. 비교 계산을 위해 캐비테이터 각도 및 몸체 유무, 몸체 어깨 길이, 몸체 직경에 변화를 주었으며, Table 1은 각 형상 기호에 대한 설명이다.

본 수치해석은 경계요소법 특성상 주어진 공동 길이를 만족하는 공동 형상과 캐비테이션수를 반복계산을 통해 찾는다. 캐비테이터 각도 30° , 몸체 길이 $L_B/D_C=25.0$, 몸체 직경 $D_B/D_C=1.0$,

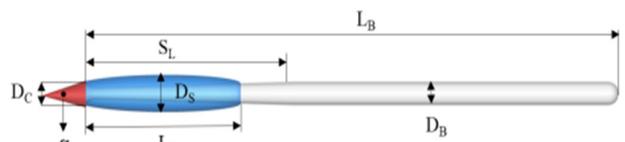


Fig. 4 Configuration of the calculation model

어깨 길이 $S_L/D_C=10.0$, 생성된 공동 길이가 $L_S/D_C=15$ 인 물수체에서 발생한 공동의 형상과 압력 및 속도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 캐비테이터에서 유속이 증가함에 따라 압력강하가 발생하고, 캐비테이터 끝단에서부터 공동이 마감되는 지점까지는 압력이 공동 내부압, 즉 증기압으로 일정함을 알 수 있다. 이후 공동이 마감되면서 유속이 느려짐에 따라 압력이 급상승하는 현상 또한 확인이 가능하며 이 같은 특성은 Table 2에 명시된 것과 같이 9번 이내 반복계산을 통해 0.1% 이하 오차율(e_i)로 수렴된 결과이다.

$$e_i = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\sigma_i} \times 100\% \quad (21)$$

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	super-cavity maximum diameter
L_S	super-cavity length

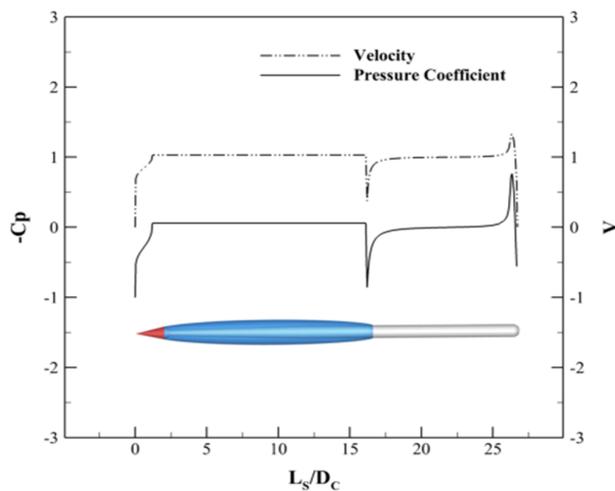


Fig. 5 Typical results of the present method

Table 2 Approximate relative error and convergence

iteration number	approximate relative error (%)	cavitation number (σ)
1	100.000	0.02167
2	52.353	0.04548
3	6.823	0.04881
4	3.424	0.04719
5	2.871	0.04588
6	1.349	0.04527
7	0.511	0.04503
8	0.158	0.04496
9	0.038	0.04495

Fig. 6은 해당 수치해석에서 계산한 압력계수와 Varghese et al.(2005)이 수행한 연구의 압력계수를 비교한 결과로, 계산에 사용된 운동체 형상을 함께 나타내었다. 이때, $\alpha=180^\circ$, $L_B/D_C=5.0$, $S_L/D_C=1.0$, $D_B/D_C=0.8$ 이다. $L_S/D_C=0.5$ 는 생성된 공동이 운동체 어깨를 전부 덮지 못한 길이 조건이며, $L_S/D_C=2.5$ 는 생성된 공동 길이가 운동체 어깨를 전부 덮은 길이 조건이다. $L_S/D_C=0.5$ 일 때와 $L_S/D_C=2.5$ 인 공동 표면의 압력계수 차이를 확인할 수 있으며, 공동이 마감되는 지점부터 두 경우 모두 압력이 급격하게 상승한다. $L_S/D_C=0.5$ 인 경우 변곡점에서 두 방법을 통해 계산된 압력 분포가 다소 차이를 보이지만, 이는 캐비테이터와 몸체를 잇는 연결부 형상 차이에서 기인한 것으로 판단되며 두 계산 결과는 대체로 동일한 특성을 보인다. Table 3은 본 수치해석 결과와 Varghese et al.(2005)의 해석 결과를 비교한 표로, 몸체가 있는 경우에 동일한 공동 길이를 생성시키기 위한 캐비테이션수를 비교해 보았다. 캐비테이터 각도 180° , 몸체 길이 $L_B/D_C=40.0$, 몸체 직경 $D_B/D_C=0.9$, 어깨 길이 $S_L/D_C=5.0$ 인 수중 운동체를 기준으로 두 결과의 오차는 10% 미만이며 공동 길이가 길어질수록, 즉 초월공동 상태에 가까워질수록 오차 또한 줄어드는 것을 알 수 있다.

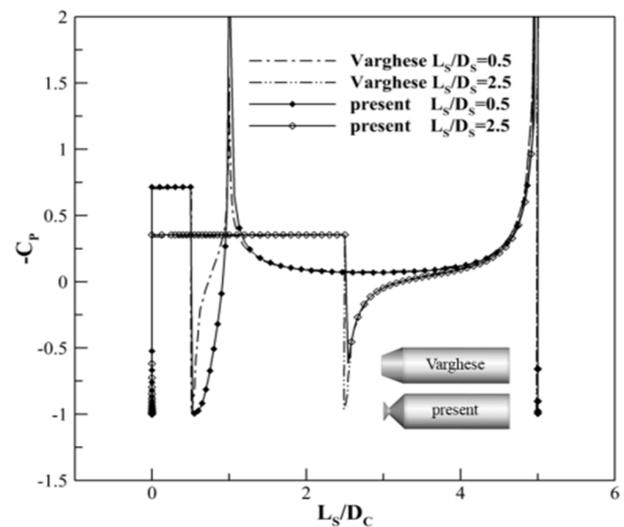


Fig. 6 Comparison of pressure distribution between two methods (Varghese and present methods)

Table 3 Non-dimensional cavity length versus cavitation number (Varghese and present methods)

L_S/D_C	Varghese	present
10.0	0.126	0.118
20.0	0.075	0.070
30.0	0.055	0.051

3.2 캐비테이터 형상 및 몸체 유무에 따른 초월공동 특성

가장 먼저 캐비테이터 각도 변화와 몸체 유무에 따른 초월공동 특성을 평가하기 위해 캐비테이터 각도가 30° , 60° ,

90°, 120°, 180°일 때 몸체 유무에 따른 비교 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 수중 운동체 형상은 Table 4와 같으며 몸체 길이는 $L_B/D_C=25.0$ 로, 몸체 직경은 $D_B/D_C=1.0$ 으로 고정하였다.

Table 4 Calculation case (1)

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

Fig. 7은 각 속도 조건에 따라 생성된 공동 길이를 캐비테이터 직경으로 무차원화한 결과이다. 캐비테이션수가 작아짐에 따라 공동 길이가 길어지고 동일한 캐비테이션수에서 비교했을 때는 캐비테이터 각도가 클수록 더 긴 공동이 생성됨을 확인할 수 있다. 몸체가 있는 경우에는 몸체가 없는 경우보다 동일한 속도 조건에서 더 짧은 길이를 갖는 공동을 생성하며 성장한 공동 길이가 초월공동 상태에 가까워질수록 몸체 유무에 따른 그래프 간격이 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉, 캐비테이터 각도와 상관없이 몸체가 있는 경우 더 짧은 공동이 생성된다. Fig. 8은 생성된 공동의 최대 폭을 캐비테이터 직경으로 무차원화한 계산 결과이다. 동일한 캐비테이션수에서 캐비테이터 각도가 클수록 더 큰 폭을 갖는 공동이 생성됨을 할 수 있으며, 앞선 길이 그래프와 달리 공동 최대 폭은 몸체 유무에 따라 발생하는 공동 형상이 크게 차이를 보이지 않는 것으로 보아 몸체 유무에 따른 영향을 받지 않는 것으로 파악된다.

앞서 기술한 특성을 더 면밀히 살피기 위해 몸체 유무에 따라 생성되는 공동 형상 특성을 Table 5에 나타냈다. 이때 캐비테이터 각도는 30°이며 캐비테이션수는 0.051로 동일하다. 그림에서 확인할 수 있듯이 동일한 캐비테이션수에서 캐비테이터 후류에 몸체가 존재하는 운동체가 그렇지 않은 운동체에 비해 상대적으로 짧은 길이를 갖는 공동을 생성시킴을 확인할 수 있다.

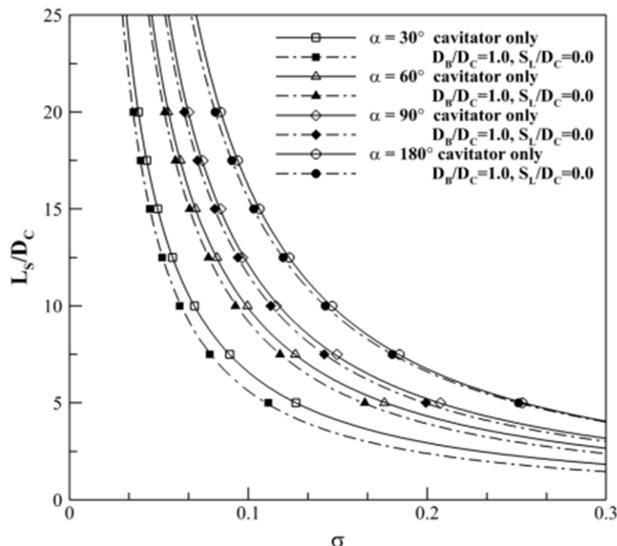


Fig. 7 Non-dimensional cavity length versus cavitation number w/ and w/o body

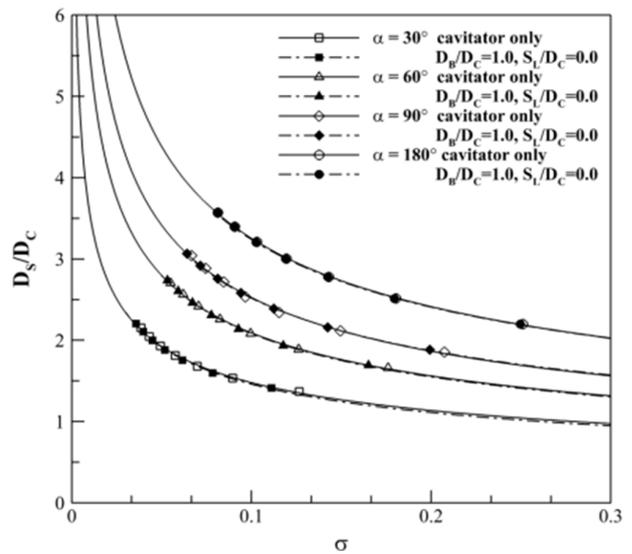


Fig. 8 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number w/ and w/o body

Table 5 Predicted cavity shapes w/ and w/o body

σ	L_S/D_C	predicted cavity shapes
0.051	14.5	
	12.5	

3.3 몸체 어깨 길이 변화 따른 초월공동 특성

몸체 전면부에 위치하는 어깨 유무 및 형상이 공동 성장에 미치는 영향을 평가하기 위해 캐비테이터 각도가 30°, 180°일 때 캐비테이터 직경으로 무차원화된 어깨 길이가 각각 $S_L/D_C=0.0, 5.0, 10.0$ 인 세 가지 경우를 비교 계산하였다.

Table 6 Calculation case (2)

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

계산에 사용된 수중 운동체 형상은 Table 6과 같으며 몸체 길이는 $L_B/D_C=25.0$ 로, 몸체 직경은 $D_B/D_C=1.0$ 으로 고정하였다.

Fig. 9는 어깨가 있을 때와 없을 때, 각 속도 조건에 따라 생성된 공동 길이를 캐비테이터 직경으로 무차원화한 해석 결과이다. 성장한 공동 길이가 어깨를 모두 덮은 경우에는 ($L_S/D_C > 10$) 어깨 형상 파라미터가 공동에 영향을 주지 않으므로 어깨 유무 및 길이에 따라 발생하는 공동 특성에 변화가 일어나지 않는다. 그러나 성장한 공동 길이가 어깨를 모두 덮지 못한 경우에는 ($L_S/D_C < 10$) 어깨 길이가 길어질수록 동일한 캐비테이션 수에서 더 긴 공동을 생성시킴을 확인할 수 있다. 즉,

어깨 길이가 길수록 동일한 속도 조건에서 더 긴 공동이 성장됨을 뜻한다. 이는 동일한 캐비테이션수에서 어깨 존재가 공동의 초기 성장을 촉진시킴을 의미하며 특히 어깨 길이가 길수록, 즉 어깨 기울기가 낮을수록 성장 폭이 크다는 것을 의미한다.

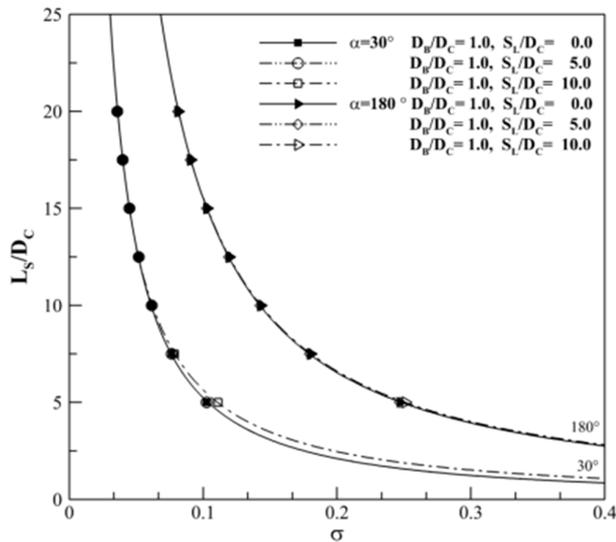


Fig. 9 Non-dimensional cavity length versus cavitation number according to shoulder length

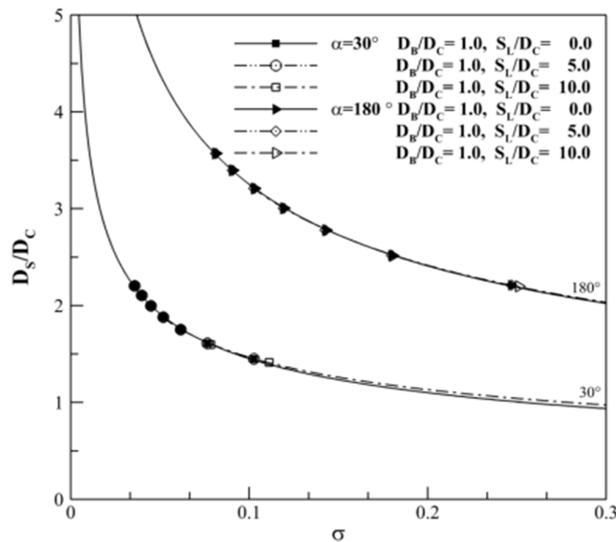


Fig. 10 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number according to shoulder length

Fig. 10은 어깨가 있을 때와 없을 때 생성된 공동 최대 폭을 캐비테이터 직경으로 무차원화한 해석 결과이다. 앞선 길이 그래프와 달리 어깨 유무 및 길이는 생성되는 공동 최대 폭에 영향을 주지 않는 것으로 확인된다.

3.4 몸체 직경 변화 따른 초월공동 특성

다음으로 몸체 직경변화가 공동 성장에 미치는 영향을 평가

하기 위해 캐비테이터 각도가 30°와 180°일 때를 캐비테이터 직경으로 무차원화된 몸체 직경이 각각 $D_B/D_C=2.0, 2.2, 2.4$ 인 세 가지 경우를 몸체가 없는 경우와 비교 계산하였다. 계산에 사용된 수중 운동체 형상은 Table 7과 같으며 몸체 길이는 $L_B/D_C=25.0$, 몸체 어깨 길이는 $S_L/D_C=10.0$ 으로 고정하였다.

Table 7 Calculation case (3)

D_B/D_C	S_L/D_C	calculation model
cavitator only		
2.0	10.0	
2.2	10.0	
2.4	10.0	

Fig. 11은 몸체 직경 변화에 따라 생성된 공동 길이를 캐비테이터 직경으로 무차원화한 계산 결과이다. 동일한 캐비테이션수에서 몸체 직경이 클수록 더 짧은 공동이 생성되며 그 차이는 생성된 공동 길이가 길어질수록, 즉 초월공동 상태에 가까워질수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 공동의 초기 생성 단계에서 몸체 직경이 공동 성장을 저해함을 의미한다. Fig. 12는 몸체 직경 변화에 따라 생성된 공동 최대 폭을 캐비

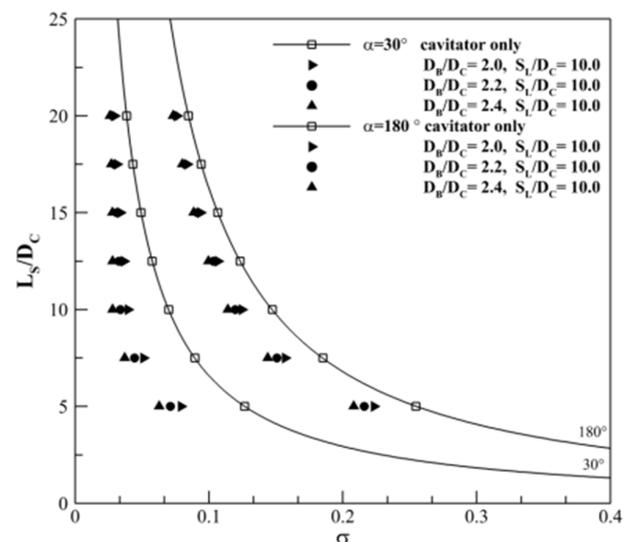


Fig. 11 Non-dimensional cavity length versus cavitation number according to body diameter

테이터 직경으로 무차원화한 계산 결과이다. 앞서 진행된 해석 결과에서 몸체 어깨 길이의 변화가 공동의 최대 폭에 미미한 영향을 끼쳤던 것과 달리, 몸체 직경변화는 공동 길이뿐만 아니라 공동 최대 폭에도 영향을 미침을 알 수 있다. 몸체 직경이 클수록 동일한 길이의 공동을 발생시키기 위하여 요구되는 캐비테이션수가 낮아지며, 이는 동일한 속도 조건에서 몸체 직경이 클수록 더 작은 폭을 갖는 공동이 생성됨을 의미한다. 즉, 몸체 직경이 공동 성장에 미치는 영향은 다른 형상 파라미터

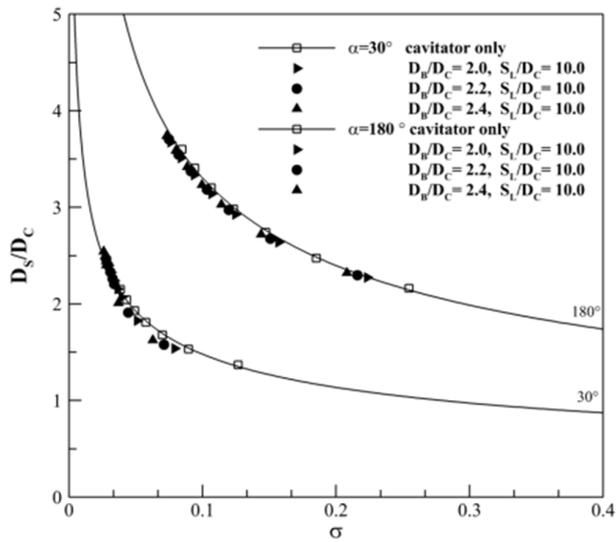


Fig. 12 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number according to body diameter

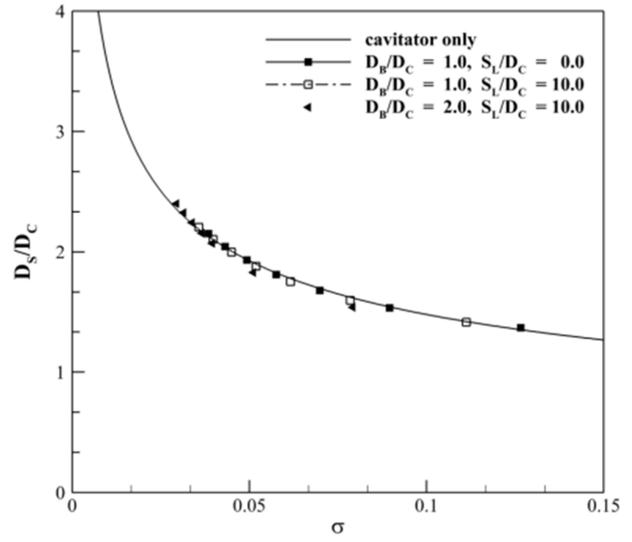


Fig. 14 Non-dimensional maximum cavity width versus cavitation number according to shoulder length

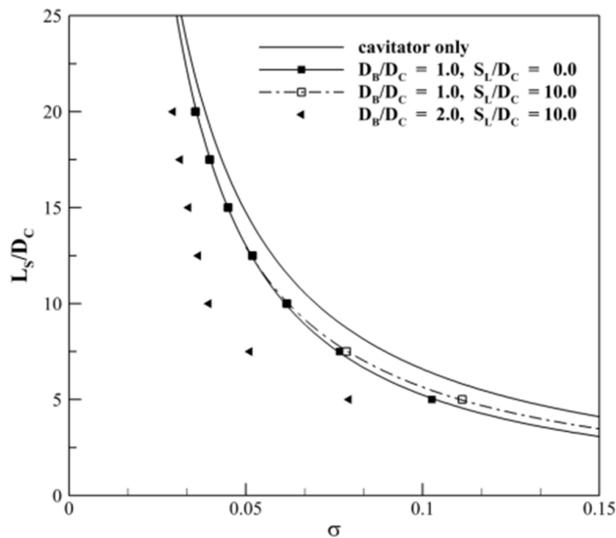


Fig. 13 Non-dimensional maximum cavity length versus cavitation number according to shoulder length

변화와 비교해 상대적으로 크게 작용하며, 직경이 클수록 동일한 캐비테이션수에서 짧고 얇은 폭의 공동이 생성된다. 앞서 계산된 3차원 물수체의 형상 변화에 따른 초월공동 수치해석 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 정리하였다. Fig. 13은 생성된 공동 길이를 캐비테이터의 직경으로 무차원화한 계산 결과이며, Fig. 14는 생성된 공동 최대 폭을 캐비테이터 직경으로 무차원화한 계산 결과이다. 캐비테이터 각도가 30°, 몸체 직경이 $D_B/D_C=1.0$, 몸체 길이가 $L_B/D_C=25.0$ 일 때를 기준으로 몸체가 있는 경우와 없는 경우, 몸체 어깨 길이가 $S_L/D_C=10.0$ 인 경우와 어깨 길이를 고정하고 몸체 직경이 $D_B/D_C=2.0$ 인 경우를 비교했다.

몸체 존재는 형상 파라미터에 상관없이 초월공동 성장을 저해시키며, 초월공동 상태에 근접할수록 몸체 영향이 줄어드는

Table 8 Calculation case (3)

σ	L_s/D_C	predicted cavity shapes
0.111	5.0	
0.079	7.5	
0.062	10.0	
0.052	12.5	
0.045	15.0	
0.040	17.5	
0.036	20	
0.026	30	

것을 확인할 수 있다. 또한, 몸체 어깨 길이 변화에 비해 몸체 직경의 변화는 발생한 공동의 형상에 큰 영향을 미치며, 공동 최대 직경은 길이에 비해 상대적으로 변화 폭이 적게 나타난다. Table 8은 캐비테이터 각도가 30°, 몸체 직경이 $D_B/D_C=1.0$, 몸체 길이가 $L_B/D_C=25.0$, 몸체 어깨 길이가 $S_L/D_C=10.0$ 인 경우에 생성된 공동 형상과 요구되는 캐비테이션수를 나타낸 표이다. 캐비테이션수가 낮아질수록 생성되는 공동 길이 및 폭이 커지며 캐비테이션수가 0.026에 도달했을 때에는 완전한 초월 공동 상태에 접어드는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

초월공동과 관련된 이전 연구들은 캐비테이터 단독 실험 및 수치해석을 중심으로 진행되어왔으나, 몸체의 형상은 후류 유동장의 압력 변동에 영향을 끼치므로 수중 운동체 형상 설계 시에 필히 고려해야 하는 영역이다. 따라서 본 연구에서는 비점성 유동해석법에 기초한 경계요소법을 적용하여 3차원 물수체의 형상 변화가 초월공동 성장에 미치는 영향을 파악하고자

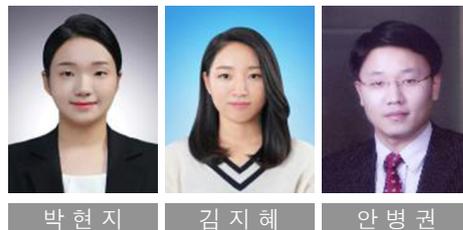
하였다. 몸체의 형상 변화 중 캐비테이터 각도, 몸체 어깨 길이, 몸체 직경의 변화를 고려하였으며 이를 캐비테이터 단독 연구 결과와 비교 계산하였다. 동일한 캐비테이션수에서 몸체 존재는 공동 성장을 저해시키고, 어깨가 존재하는 경우에는 존재하지 않는 경우보다 더 긴 공동을 생성함을 확인하였다. 또한 몸체 직경 변화는 공동 길이 성장에 가장 큰 영향을 미치는 영역이며 몸체의 직경이 클수록 유동 흐름을 방해하여 후류 유동장의 압력이 상승하고, 이로 인해 더 짧고 얇은 폭을 갖는 공동이 생성됨을 확인하였다. 이를 통해 초월공동 수중 운동체의 초기 설계 단계에서 몸체가 공동 성장에 미치는 영향을 충분히 파악할 필요가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 원천기술개발사업(NRF-2014M3C1A9060786)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.
- Garabedian, P. R., 1956. Calculation of axially symmetric cavities and jets. *Pacific Journal of Mathematics*, 6(4), pp.611-684.
- Jeong, S.W. & Ahn, B.K., 2016. Numerical analysis of cavitating flow around two-dimensional wedge-shaped submerged bodies under the wall effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(4), pp.321-328.
- Kim, J.H. & Ahn, B.K., 2018. Numerical analysis of supercavitating flow around axisymmetric underwater objects using a viscous-potential method. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(2), pp.364-377.
- 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.
- Park, H.J., Kim, J.H. & Ahn, B.K., 2018. Numerical analysis of supercavitation according to shape change of the two-dimensional submerged body. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(1), pp.1-8.
- Rouse, H. & McNown, J.S., 1948. Cavitation and pressure distribution: head forms at zero angle of yaw. *Studies in Engineering, Bulletin 32, State University of Iowa, No. 420*.
- Tulin, M., 1953. Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies. *David Taylor Model Basin Report No 834*.
- Varghese, A.N., Uhlman, J.S. & Kirschner, I.N., 2005. Numerical analysis of high-speed bodies in partially cavitating axisymmetric flow. *Journal of Fluids Engineering*, 127(1), pp.41-54.
- Waid, R.L. & Lindberg, Z., 1957. Experimental and theoretical investigations of a supercavitating hydrofoil. *California Institute of Technology Report No 47-8*.
- Wu, T., 1956. A free streamline theory for two-dimensional fully cavitating hydrofoils. *Journal of Mathematics and Physics*, 35, pp.403-442.



박 현 지

김 지 혜

안 병 권