

VP-BEM 기법을 이용한 초공동 수중 운동체의 형상 및 수심 변화에 따른 수치해석

황대규¹⁾ · 안병권^{*,1)} · 박정훈²⁾ · 전윤호²⁾ · 황종현³⁾

¹⁾ 충남대학교 선박해양공학과

²⁾ LIG넥스원(주) 기계융합연구소

³⁾ LIG넥스원(주) 해양연구소

Numerical Analysis of the Supercavitating Underwater Vehicle According to Different Shapes and Depth Conditions Using a VP-BEM Method

Dae-Gyu Hwang¹⁾ · Byoung-Kwon Ahn^{*,1)} · Jeong-Hoon Park²⁾ · Yun-Ho Jeon²⁾ · Jong-Hyon Hwang³⁾

¹⁾ Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Korea

²⁾ Mechanical R&D Center, LIGNex1 Co., Ltd., Korea

²⁾ Maritime R&D Center, LIGNex1 Co., Ltd., Korea

(Received 24 December 2020 / Revised 24 February 2021 / Accepted 19 March 2021)

Abstract

In recent years, the maturity of the technology for a high speed underwater vehicle using supercavitation increase, it is entering the stage of applied research for practical use. In this study, hydrodynamic performance of the supercavitating object was evaluated by using a Viscous-Potential based Boundary Element Method(VP-BEM). 27 models with different shape parameters such as body diameter, length and fore-body shape were considered. The process of the supercavity development of each model was simulated, and drag generated according to operating conditions such as changes in water depth was analyzed.

Key Words : Supercavitation(초공동), Underwater Vehicle(수중 운동체), Design Parameter(설계 파라미터), Boundary Element Method(경계요소법)

1. 서론

최근 들어 초공동(Supercavitation)을 이용한 수중 운

동체의 고속화에 대한 국내 기술의 성숙도가 높아지면서 실용화를 위한 응용연구 단계로 진입하고 있다. 초공동 수중 운동체의 핵심기술로는 초공동을 발생시키고 성장시키는 역할을 하는 캐비테이터 시스템(cavitator system), 추력편향(thrust vectoring) 방식을 포함한 고속 추진시스템(propulsion system), 캐비테이터

* Corresponding author, E-mail: bkahn@cnu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

와 제어판을 사용한 고속 운동체 제어시스템(control system), 특정 임무 수행을 위한 유도시스템(guidance system)과 배기가스 또는 압축가스를 이용하여 인공적으로 초공동을 발생시키는 환기공동시스템(ventilation system)으로 구분할 수 있다. 이 중 수중 운동체 전체를 덮을 만큼의 충분한 초공동을 발생시켜 물과의 마찰저항을 감소시키는 역할을 하는 장치가 캐비테이터이다.

그동안 캐비테이터에서 발생하는 초공동 다상유동에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 수치해석법에서는 배리어 패널, 재진입 모델 그리고 오픈 웨이크 모델 등 다양한 공동모델이 제안되고 논의되어 왔으며^[1], 군사적인 목적으로의 연구^[2]와 프로펠러에 적용하는 연구^[3]가 진행되었다. 캐비테이션 터널에서의 모형시험을 통해 다양한 형상과 크기의 캐비테이터를 이용한 실증연구^[4]와 자연 및 인공 초공동의 차이에 관한 연구^[5] 등 기초 연구가 진행되었다. 또한 제어판의 단독 및 캐비테이터와 상호작용^[6], 주기적인 유동장^[7], 중력과 캐비테이터의 반응각^[8] 등 운동체 제어기술 연구가 주로 이루어져 왔다.

하지만 공동발달 초기 단계에서 필연적으로 발생하는 물체의 영향에 관한 연구는 미비한 편이며, 본 연구는 공동발달 초기 단계에서 물체 형상 변화에 따른 초공동의 발생 특성을 평가하고 작용하는 유체력을 계산하였다.

본 연구에서 사용한 비점성 경계요소법에 기반한 수치해석법은 상용 점성 해석법(CFD)에 비해 계산시간이 매우 짧은 장점이 있어 초기설계에 적합하다. 초공동 수중 운동체의 설계 파라미터인 운동체 전두부의 길이, 물체의 지름 및 길이 등을 변화시키며 총 27종의 모델을 대상으로 해석을 수행하였으며, 특히 다양한 수심 조건에서 초공동의 발생 특성과 유체력을 계산하여 평가 및 초기설계 방향을 설정하였다.

2. VP-BEM 기반 수치 해석법

본 해석법은 비점성 유동에 기반한 경계요소법을 사용하여 3차원 축 대칭형 수중 운동체에서 발생하는 초공동 유동을 계산한다. X축이 유동의 방향이며, 수중 운동체와 캐비테이터 끝단에서 생성된 공동의 형상은 Fig. 1과 같다. 여기서 S_T 는 캐비테이터, S_c 는 초공동의 영역으로 정의한다.

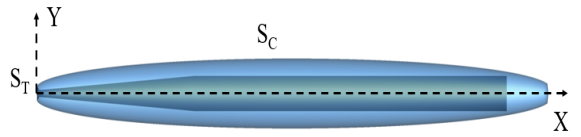


Fig. 1. Coordinate system

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

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

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

$$\nabla \Phi = \underline{U}_\infty \quad (at \underline{x} = \infty) \tag{3}$$

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

$$p = p_0 \tag{5}$$

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

이때 ϕ 는 교란 속도 포텐셜, \hat{n} 은 경계면에서 유체영역으로 향하는 법선 벡터, Φ 는 유동의 전체 속도 포텐셜, \underline{V} 는 경계면 유동 속도, \underline{U}_∞ 는 유입 속도이며, \underline{x} 는 경계면의 위치이다. 또한 $f(x, y, t)$ 는 생성된 공동의 형상 함수이며, p 는 공동의 내부압력, p_0 는 유체의 증기압이다. 식 (6)은 공동마감 조건으로 t^c 는 공동의 두께이고, $x_{T.E.}$ 는 공동이 마감되는 위치이며, 결국 공동은 일정한 길이를 가지면서 닫힘을 의미한다. 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 있다. 이때 다이폴은 경계면 전체에 분포하고 소스는 공동표면에 분포시켜 공동의 형상 변화량으로 사용하게 된다. μ 는 다이폴의 세기, q 는 소스의 세기, G 는 Green 함수이다.

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

동력학적 경계조건의 식 (5)는 베르누이 방정식을 적용하면, 공동표면의 접선방향 속도벡터(\underline{V}_t)의 크기가 일정하다는 조건으로 표현 가능하며, 공동표면의 속도 포텐셜은 식 (8)으로 나타낼 수 있고, 공동마감 조건의 식 (6)은 식 (9)로 정리할 수 있다. 이 식에서 $\underline{x}_{C.T.E}$ 는 캐비테이터 끝의 위치이며, s 는 공동표면의 길이, l_{CAV} 는 공동의 길이를 의미한다.

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

$$\int_0^{l_{CAV}} \frac{q}{|U_\infty|} \Delta s = 0 \quad (9)$$

위의 식들을 이용하면 최종 적분방정식인 식 (10)을 얻을 수 있고, 공동마감 조건을 적용하여 Fig. 2와 같이 대수방정식으로 표현할 수 있다. 여기서 D_1 , D_2 , D_3 는 다이폴에 의해 유기되는 속도 포텐셜, S 는 소스에 의해 유기되는 속도 포텐셜, \underline{c} 는 공동마감 조건, \underline{b} 는 유입 속도의 벡터를 의미하며, 이때 \underline{x} 는 미지수로서 다이폴과 소스의 세기, 그리고 공동표면의 접선 속도벡터이며 구하고자 하는 항이며, 자세한 사항은 Ahn et al.^[9]에 기술되어있다.

$$\sum_{j=0}^{N^x-1} \mu_j D_{ij} + \sum_{j=N^x}^{N^d-1} \mu_{C.T.E} D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^c-1} q_k S_{ik} - \underline{V}_t \sum_{j=N^x}^{N^d-1} g_j D_{ij} = -U_\infty \cdot \underline{x}_i \quad (10)$$

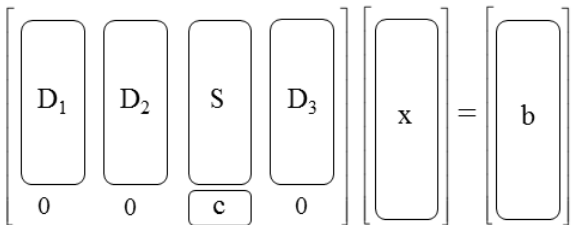


Fig. 2. Algebraic form of the discretized integral equations

공동이 발생하여 초공동으로 성장하는 과정에서 몸체의 일부는 캐비테이터에서 발생한 부분 공동으로 덮여있고 나머지 부분은 물과 접촉한다. 이때 항력 성분은 운동체 속도의 제곱에 비례하는 압력저항과 물과의 접촉 면적에 비례하는 마찰저항으로 구분할 수 있다. 접수 표면적(wetted surface area)은 공동의 상 경계면과 몸체의 형상 파라미터를 이용하여 정밀히 계산할 수 있으며, 공동의 상 경계면과 몸체가 만나는 지점을 Fig. 3에 나타내었다. 계산된 접수 표면적에 각 속도 조건에서 계산되는 평판의 마찰저항을 이용하여 실제와 유사한 마찰항력을 계산하며, 마찰항력에 캐비테이터에서 계산되는 압력항력을 더하여 실제 수중 운동체의 전체항력 예측할 수 있다. 다양한 환경조건과 몸체 형상 파라미터를 적용하여 초기설계 단계에서 효율적인 몸체를 선택할 수 있다.

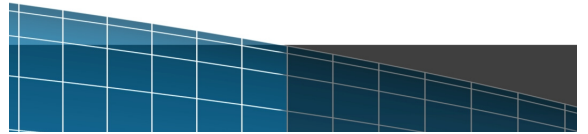


Fig. 3. Wetted surface area evaluation process

평판의 마찰저항 계산에 ITTC1957 식 (11)를 사용하였으며, 항력계수는 식 (12)와 같이 몸체의 직경(D_B), 즉 운동체 정면도면적(frontal area)으로 무차원화 하였다. 초공동 성능 평가를 위한 캐비테이션수와 레이놀즈수는 식 (13)과 식 (14)로 정의하였으며, 여기서 p_∞ , p_v , U_∞ , ρ , ν , L_B 는 각각 유입 유동장의 압력, 증기압, 유속, 밀도, 동점성계수, 수중 운동체의 길이이다.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10}(Rn) - 2)^2} \quad (11)$$

$$C_{DB} = \frac{Drag}{\frac{1}{8} \rho \pi U_\infty^2 D_B^2} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (13)$$

$$Rn = \frac{U_\infty L_B}{\nu} \quad (14)$$

수중 운동체의 형상 파라미터와 초공동에 대한 기호와 설명은 Fig. 4 및 Table 1과 같다.

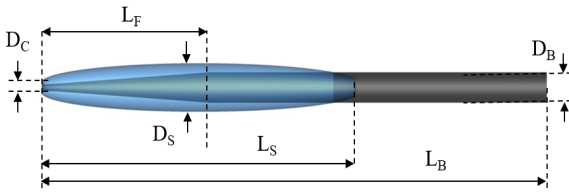


Fig. 4. Design parameters

Table 1. Symbol and description

Symbol	Description
D_C	Cavitator Diameter
D_B	Body Diameter
L_F	Fore-body Length
L_B	Body Length
D_S	Supercavity Maximum Diameter
L_S	Supercavity Length

3. 해석 결과 및 분석

Fig. 5는 초기 지정된 수중 운동체의 기하학적 형상 파라미터와 수심, 온도, 물의 증기압 등 운용조건에 대한 입력값을 기준으로 본 해석의 계산 절차와 몸체 형상 파라미터 결정 과정을 보여준다. Table 2는 평판형 캐비테이터에서 발생하는 공동길이가 $[L_S/D_C = 5.0]$ 인 경우에 대한 캐비테이션수의 수렴성 평가 결과를 보여주며, 물과 초공동의 상 경계면에 대한 동력학적 경계조건에 대한 수렴 기준을 만족할 때까지 반복 계산을 수행하였다. 10회 반복 계산 이후 상대 백분율 오차는 0.2% 이하로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 수중 운동체의 형상 파라미터의 변화에 따른 초공동 성능을 평가할 목적으로 몸체의 직경(D_B)과 길이(L_B) 그리고 전두부의 길이(L_F)를 변화시켜가며 총 $27(3^3)$ 종의 형상에 대해 계산을 수행하였으며, Table 3은 계산에 사용한 파라미터의 실제 크기를 나타내었다. Fig. 6은 Table 2의 형상 파라미터 중 $D_B/D_C = 3.0$, $L_F/D_C = 15.0$, $L_B/D_C = 40.0$ 인 경우에 대해 속도 조건의 변화에 따라서 발생하는 초공동의 발달과정을 보여주며, 이를 통해 공동이 몸체를 덮는 시점, 즉 초공동 상태로 발달하는 속도는 73.4 m/s임을 확인할 수 있다.

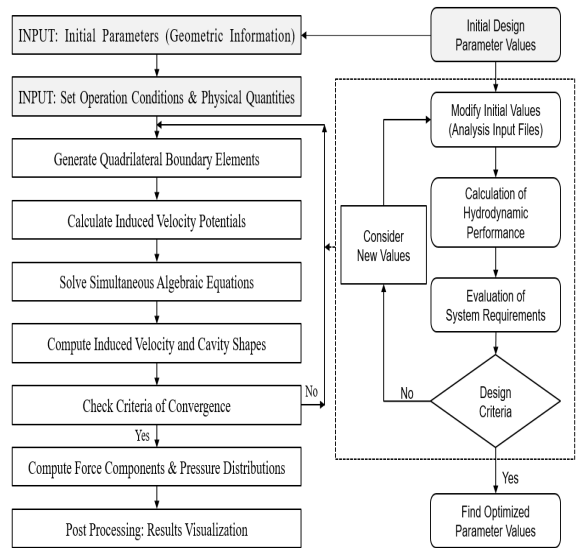


Fig. 5. Analysis and design procedure

Table 2. Convergence process of cavitation number

Iteration No.	σ	상대 오차 [%]
1	0.1370	-
2	0.1739	21.191
3	0.1658	4.876
5	0.1492	4.785
10	0.1428	0.197
15	0.1448	0.110

Table 3. Parameter and values

Symbol	D_C	D_B	L_F	L_B
Dimensional [mm]	50	100	500	2,000
		125	750	2,250
		150	1,000	2,500

Fig. 7과 8은 해당 모델의 속도 증가에 따른 작용 항력 값과 캐비테이션수에 따른 항력계수를 보여준다. 이때 항력은 압력항력과 마찰항력으로 구분하여 살펴볼 수 있으며, 이는 본 해석법의 전형적인 결과로 나머지 경우도 동일 계산을 거쳐 공동의 발달 특성과 함께 작용하는 유체력을 평가하였다.

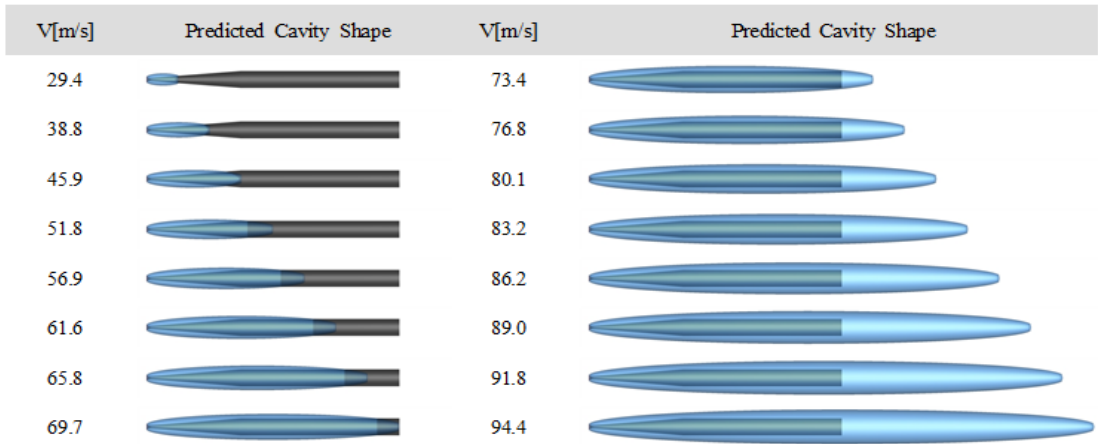


Fig. 6. Predicted cavity shape($D_B/D_C = 3.0$, $L_F/D_C = 15.0$, $L_B/D_C = 40.0$)

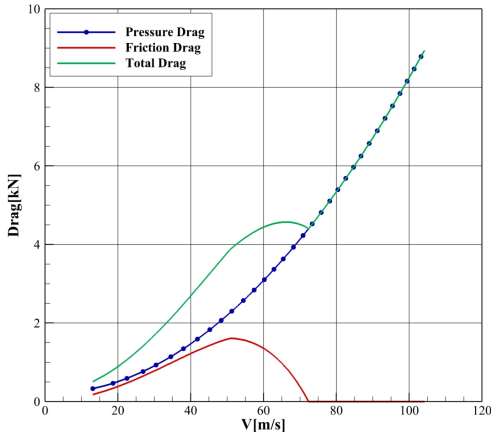


Fig. 7. Predicted drag force

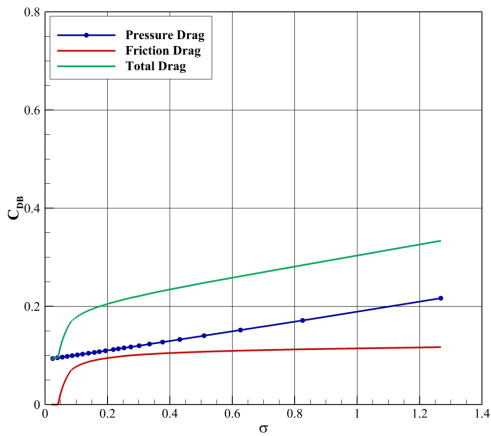


Fig. 8. Predicted drag coefficient

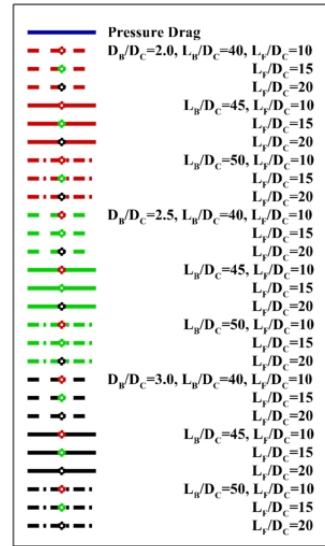


Fig. 9. Legend for Fig. 10~12

Fig. 10(범례 참조, Fig. 9)은 전체 27종의 형상설계 파라미터에 대한 항력 계산 결과이다. 공동이 발달하는 초기 단계, 즉 상대적으로 낮은 속도 영역에서의 압력항력과 마찰항력을 구분하여 평가할 수 있다. 이는 Fig. 11과 같이 캐비테이션수에 따른 특성과 함께 비교하면, 형상 파라미터 변화에 따른 항력 특성을 파악하기에 쉬우며 몸체의 형상 파라미터의 변화가 공동발달의 초기에 어떠한 영향을 미치는지 평가할 수 있다. 즉, 공동발달 초기에는 몸체가 길고 전두부의 길이가 짧을수록 항력계수가 큰 것을 알 수 있다.

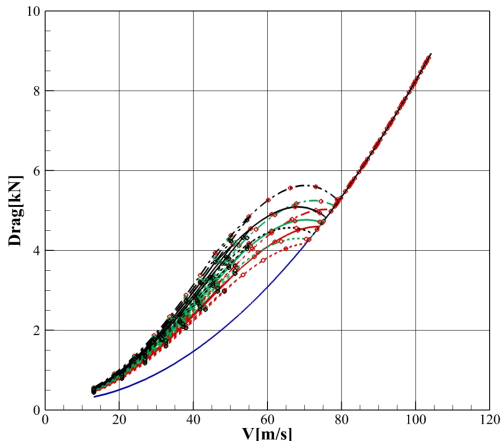


Fig. 10. Drag force v.s. velocity

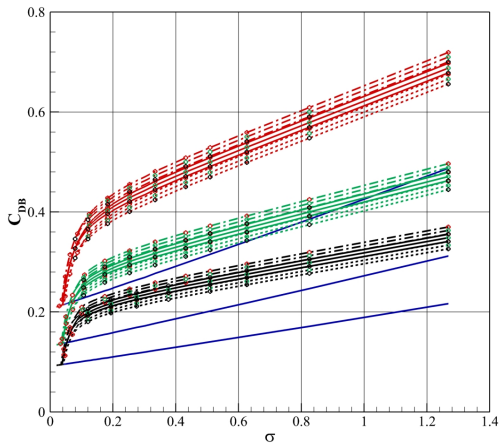


Fig. 11. Drag coefficients v.s. Cavitation number

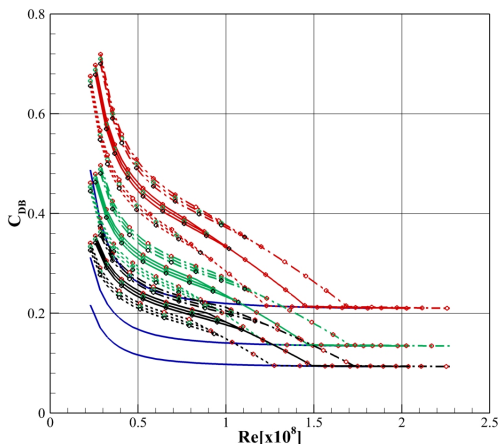


Fig. 12. Drag coefficient v.s. Reynolds number

Fig. 12는 동일 결과를 레이놀즈수에 대하여 나타낸 것으로 상대적으로 고속 영역에서 형상 파라미터가 항력계수에 미치는 영향을 쉽게 확인할 수 있다. 초공동 수중 운동체의 항력 특성은 몸체의 두께 및 길이에 따라 변화의 경향성이 구분된다. 즉, 몸체의 길이가 같을 경우, 몸체의 두께에 상관없이 거의 동일 레이놀즈수에서 공동이 몸체를 덮게 되어 초공동으로 성장하고, 이때 전체항력계수가 압력 항력계수로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

수중 운동체는 임무에 따라 다양한 수심 조건에서 운용된다. 그러나 수심이 깊어지면 유동장의 정수압이 증가(10 m 당 약 1기압)하여 결과적으로 초공동 발생이 지연되기 때문에 수심 변화에 따른 초공동의 발달 특성과 항력 특성, 즉 요구 추력을 정확히 평가하는 것이 중요하다. Fig. 13은 각 수심 조건에서 특정 길이의 초공동이 발생할 때 캐비테이터에 작용하는 압력항력 결과로, 수심은 1 m 이후 5 m 단위로 60 m까지 총 13개의 수심에 대하여 계산을 수행하였다. 수심이 깊어짐에 따라서 각 항력도 그에 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 동일수준의 공동 형상 및 길이를 유지하기 위하여 더 큰 추력이 필요함을 의미한다. Fig. 14는 동일 조건에서의 초공동 발생에 필요한 속도로, 앞서 확인하였듯이 수심이 깊어질수록 동일 공동의 형상을 유지하기 위해서는 요구되는 속도가 어떻게 증가하는지를 알 수 있다.

수심 변화와 형상 파라미터의 변화가 항력에 미치는 영향을 보이기 위하여 27종의 모델 중 Table 4와 같이 전체항력이 최대가 되는 지점인 hump의 값이 유사한 3종의 형상을 선정하였다.

Table 4. Calculation models for different depth conditions

Symbol	Model 1	Model 2	Model 3
D _C	50 mm	50 mm	50 mm
D _B	100 mm	125 mm	150 mm
L _F	500 mm	500 mm	500 mm
L _B	2,500 mm	2,500 mm	2,250 mm

Fig. 15~17은 각 모델의 수심 조건과 속도의 변화에 따른 항력 값이다. hump를 함께 표시(검은색 실선)하였으며, Table 5에 그 값을 나타내었다. 초공동 상태에

이르기 직전, 즉 마찰항력이 최대인 지점에서의 총 항력 값은 수심 60 m에서 1 m 보다 약 6.2에서 6.5배 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 초공동 상태에 이르기 위해서는 최소 6배 이상의 추력이 필요하다는 것을 의미한다.

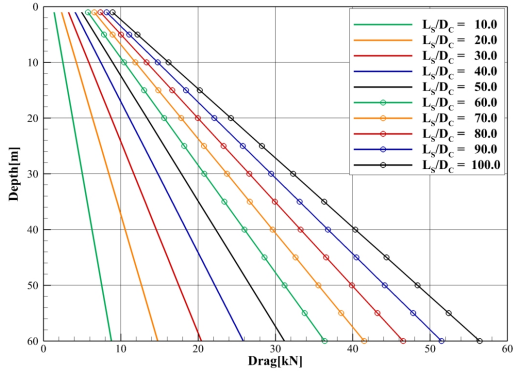


Fig. 13. Drag forces according to different depths

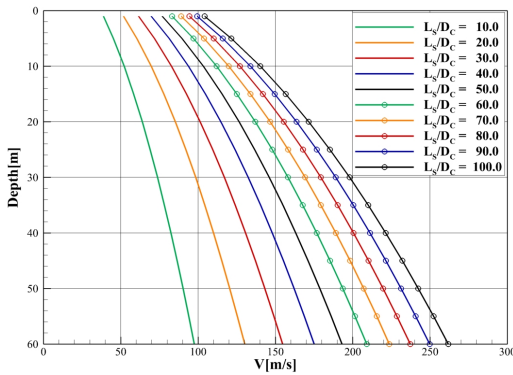


Fig. 14. Required speed according to different depths

Table 5. Hump drag according to different depths

Depth	Model 1	Model 2	Model 3
1 m	5.0 kN	5.2 kN	5.1 kN
10 m	9.1 kN	9.4 kN	9.1 kN
20 m	13.6 kN	14.1 kN	13.6 kN
30 m	18.1 kN	18.7 kN	18.0 kN
40 m	22.6 kN	23.3 kN	22.5 kN
50 m	27.1 kN	28.0 kN	26.9 kN
60 m	31.6 kN	32.6 kN	31.3 kN

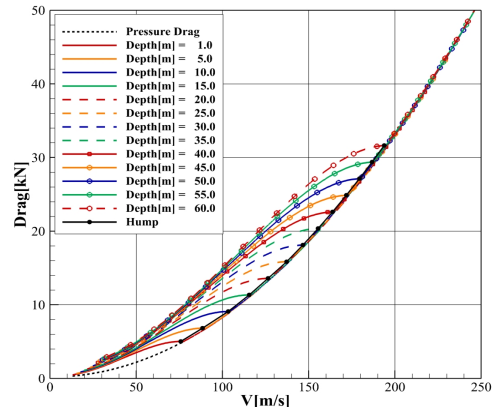


Fig. 15. Predicted drag according to different depth conditions(Model 1)

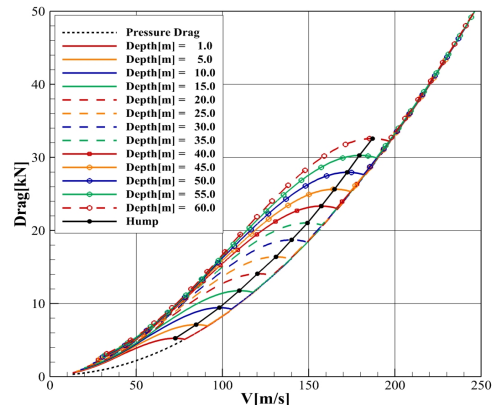


Fig. 16. Predicted drag according to different depth conditions(Model 2)

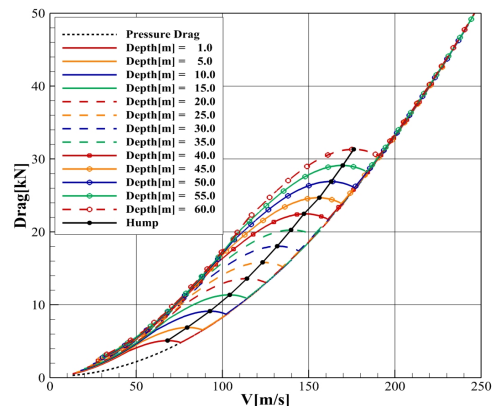


Fig. 17. Predicted drag according to different depth conditions(Model 3)

4. 결 론

초공동 수중 운동체의 실용화 응용연구 단계에서 가장 필요한 기술 중 하나는 초기설계 단계에서 다수의 설계 형상 파라미터에 대한 초공동 성능을 짧은 시간에 해석하여 비교, 평가하는 것이다. 본 연구는 비점성 유동에 기반한 경계요소법을 적용하여 수중 운동체에서 발생하는 초공동 형상과 유체력을 계산할 수 있는 전용 다상유동 해석법을 개발하고, 수중 운동체의 설계 형상 파라미터 변화 따라 발생하는 초공동 성능을 평가하고자 하였다. 운동체의 전두부 및 몸체의 지름과 길이의 변화에 따른 초공동 형상과 항력을 해석하고 비교, 평가하기 위하여 27종의 기본 형상에 대한 계산을 수행하였다. 본 해석법은 공동의 발달 초기 단계, 즉 부분적으로 공동이 발생하는 낮은 속도 영역에서는 압력항력과 마찰항력을 구분하여 그 특성을 설계자가 쉽게 평가할 수 있으며, 특히 캐비테이션 수와 레이놀즈수에 따른 초공동 발달과 형상 정보 및 항력 특성을 파악하기에 용이하다.

본 연구를 통해 몸체의 형상 파라미터의 변화가 공동발달의 초기(저속 영역)와 초공동 발생 이후(고속 영역)에 어떠한 영향을 미치는지 평가하였다. 몸체의 두께 및 길이에 따라 항력 특성의 경향성이 결정되며, 특히 몸체의 길이가 같을 경우, 몸체의 두께에 상관없이 거의 동일 레이놀즈수에서 공동이 몸체를 덮게 되어 전체항력계수가 압력 항력계수로 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 수심 변화가 항력 특성에 미치는 영향을 평가하였으며, 초공동 수중 운동체의 초기 설계 단계에서 몸체의 형상 파라미터와 운용 수심 변화에 따른 초공동 성능을 해석하였다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2019R1A2C1084306)과 LIG넥스원에서 수행한 “초공동 수중 운동체 직진주행제어를 위한 형상설계 및 성능 분석 기술” 자체 선행연구 과제의 연구 결과 중 일부임을 밝힙니다.

References

- [1] Wu, T., “A Free Streamline Theory for Two-Dimensional Fully Cavitated Hydrofoils,” *Journal of Mathematics and Physics*, 35, pp. 403-442, 1956.
- [2] Tulin, M., “Steady Two-Dimensional Cavity Flows about Slender Bodies,” Navy Dept.: Washington D.C., 1953.
- [3] Lee C. S., “A Potential-Based Panel Method for the Analysis of a Two-Dimensional Partially-Cavitating Hydrofoil,” *Papers of The Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 1, pp. 15-25, 1993.
- [4] Kim, J. H. Jung, S. W. Ahn, B. K. & Jeon, Y. H., “A Study on Natural Supercavitation and Drag Characteristics of Axisymmetric Cavitators,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 53, No. 6, pp. 465-472, December 2016.
- [5] Ahn, B. K. Jung, S. W. Kim, J. H. Jung, Y. R. & Kim, S. B., “Experimental Study on Artificial Supercavitation of the High Speed Torpedo,” *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 300-308, 2015.
- [6] Jung, S. W. Park, S. T. & Ahn, B. K. An, “Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of a Control Fin for a Supercavitating Underwater Vehicle,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 55, No. 1, pp. 75-82, February 2018.
- [7] Jung, S. W. Park, S. T. & Ahn, B. K., “Experimental Investigation of Artificial Supercavitation under Periodic Gust Flows,” *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 188-194, 2018.
- [8] Kim, M. J. Yi, J. G. Kim, S. B., “The Study of Prediction Method of Cavity Shape Considering Both Gravity Effect and Angle of Attack of Cavitator,” *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 180-187, 2018.
- [9] Ahn, B. K. Kim, J. H. Choi, J. K. Kim, H. T. Nah, Y. I. & Lee D. H., “Numerical Analysis of Supercavitating Flows based on Viscous/Inviscid Method,” *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 25-32, 2014.