

# 극초고속 수중운동체의 저항감소기법 연구

안병권\* · 이창섭\* · 김형태\*

## Study on Drag Reduction of Hyper-speed Underwater Vehicles

Byoung-Kwon Ahn\* · Chang-Sup Lee\* · Hyoung-Tae Kim\*

### ABSTRACT

Recently underwater systems moving at hyper-speed such as a super-cavitating torpedo have been studied for their practical advantage of the dramatic drag reduction. In this study we are focusing our attention on super-cavitating flows around axisymmetric cavitators. A numerical method based on inviscid flow is developed and the results for several shapes of the cavitator are presented. First using a potential based boundary element method, we find the shape of the cavitator yielding a sufficiently large enough cavity to surround the body. Second, numerical predictions of super-cavity are validated by comparing with experimental observations carried out in a high speed cavitation tunnel at Chungnam National University (CNU CT).

### 초 록

최근 초월공동 어뢰와 같이 극초고속으로 이동하는 수중운동체의 저항감소기법에 대한 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 수중 운동체 주위의 초월공동 동을 해석할 수 있는 수치기법을 개발하고, 다양한 형상을 가지는 축대칭 운동체에서 발생하는 초월공동을 추정하였다. 또한 충남대학교 캐비테이션 터널에서 실험을 수행하여 발생하는 초월공동을 관찰하고 개발된 수치기법의 결과와 비교, 검증하였다.

Key Words: Super-cavitation(초월공동), Cavitator(캐비테이터), Cavitation tunnel(캐비테이션 터널), Axisymmetric body(축대칭 물체), Drag reduction(저항감소)

### 1. 서 론

수중에서 이동하는 물체의 속도가 높아져 물

체주위의 국부압력이 유체의 증기압보다 낮아지면 유체는 기화하게 되어 공동(cavitation) 현상이 발생한다. 이동 속도가 더욱 증가하게 되면 공동은 수중 이동물체의 형상을 덮을 만큼 성장하게 되는데 이를 초월공동(super-cavitation)이라 한다. 초월공동이 발생하게 되면 수중 이동물체

\* 충남대학교 선박해양공학과  
연락처, E-mail: bkahn@cnu.ac.kr

는 마치 공기 중에서 이동하는 것과 같은 효과가 발생하게 되어 물체에 작용하는 항력(drag)은 극적으로 감소하게 된다. 이 같은 초월공동을 이용하여 수중에서 극초고속으로 이동할 수 있는 어뢰에 대한 연구가 시도되고 있다[1,2,3]. 현재 러시아에서는 200 노트의 속도로 이동하는 Shkval이라는 초월공동 어뢰를 개발하여 운용하고 있는 것으로 알려져 있으며, 독일과 미국에서도 유사한 초월공동 어뢰에 대한 연구가 수행 중인 것으로 알려져 있지만 군사목적의 개발단계로 제한적인 정보들이 알려져 있다. 이와 같은 어뢰의 전면에는 공동을 발생시키고 이를 초월공동으로 성장시키는 역할을 하는 다양한 형태의 캐비테이터(cavitator)가 설치 되어있다.

본 연구에서는 초월공동 어뢰의 여러 캐비테이터 형상에서 발생하는 공동을 예측할 수 있는 이론해석법을 개발하고, 캐비테이션 터널 실험을 수행하여 발생하는 초월공동을 관측하였다. 수중에서 발생하는 공동현상은 선박의 프로펠러와 같이 고속으로 회전하는 물체에서는 피할 수 없는 현상으로 그동안 이에 대한 물리적 특성과 이론해석법들은 조선공학 분야에서 꾸준히 발전되어 왔다[4,5,6]. 본 연구에서는 비점성 유동해석법에 기초한 경계요소법 (boundary element method)을 바탕으로 축대칭 물체에서 발생하는 초월공동의 생성 메커니즘을 구현하고 발생하는 초월공동의 크기와 작용하는 항력을 계산할 수 있는 해석법을 개발하였다. 그 결과는 엄밀해[7]가 존재하는 경우와 비교하였으며, 또한 캐비테이션 터널 실험을 통한 관측결과와 비교하여 해석방법의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 수치해석법의 정규화

먼저 캐비테이터 주위의 유동은 비점성, 비압축성, 비회전성인 포텐셜 유동을 가정한다. 이 경우 유동속도는 유입속도와 교란속도 포텐셜로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\vec{V} = \nabla\Phi = \nabla(U_\infty \cdot \vec{x} + \phi) \quad (1)$$

여기서  $U_\infty$ 는 유입속도,  $\vec{x}$ 는 위치벡터,  $\phi$ 는 교란속도 포텐셜을 의미한다.

위에서 가정한 포텐셜 유동은 질량보존의 법칙을 만족시켜야 하며, 이는 아래와 같이 라플라스 방정식으로 표현되는 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = \nabla^2\Phi = 0 \quad (2)$$

본 연구에서는 캐비테이터의 기본적인 형상에 해당하는 Fig. 1과 같은 2차원 대칭형 캐비테이터 주위의 초월공동에 대해 수치해석 모델링을 수행하였다.

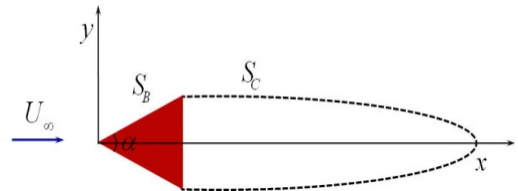


Fig. 1 Symmetric body (cavitator) and cavity surface

여기서  $S_B$ 와  $S_C$ 는 캐비테이터와 초월공동 표면 을 의미한다.

먼저, 위에서 고려한 모델링에 대해 식 (3)과 같이 무한 원방에서의 교란속도는 없으며, 식 (4)와 같이 물체표면을 통해서 유체가 침투할 수 없다는 경계조건을 적용한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \nabla\Phi = U_\infty \quad (3)$$

$$\nabla\Phi \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot U_\infty \quad (4)$$

여기서  $\vec{n}$ 은 경계면에서 바깥쪽으로 향하는 단위 법선벡터(unit normal vector)를 의미한다.

다음으로 식 (5)와 (6)과 같이 주어진 조건에서 공동표면은 시간에 따라 일정한 값을 가지며, 그 표면에 작용하는 압력은 증기압과 같다고 가정 한다.

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

$$p = p_v \quad (6)$$

여기서  $f(x,y)$ 는 공동표면을  $p_v$ 는 유체의 증기압을 의미한다.

또한, 물체의 끝에서 시작되는 공동은 주위 압력이 증기압보다 높아지는 지점에서 Fig. 1과 같이 자연스럽게 마감된다고 가정한다. 그동안 초월공동이 실제 물리적 현상과 유사하게 마감되도록 하는 다양한 조건들이 제시되었다[4,8,9]. 그 중 Lee [4]는 공동의 형상은 공동표면을 형상화하는 소스(source)의 크기에 의존적이며, 공동이 마감되기 위해서는 소스의 합이 0이 되어야 한다는 선형화된 마감조건을 제시하였다. 본 연구에서는 이와 같은 선형화된 공동마감조건을 적용하였으며, 이를 위해 공동의 끝에서는 마치 날개의 뒷날(trailing edge)에서와 같이 유체가 박리된다고 가정하였다. 즉 축대칭 유동에서 공동이 마감되는 지점의 속도는 0이라고 가정하였다.

베르누이 방정식으로부터 속도와 압력의 관계식은 아래 식 (7)과 같이 정리할 수 있으며, 압력계수의 음의 값(- $C_p$ )은 식 (8)과 같이 캐비테이션 수( $\sigma$ )와의 관계식으로 표현할 있다.

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = 1 - \left( \frac{V}{U_\infty} \right)^2 \quad (7)$$

$$-C_p = \frac{p_\infty - p}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} > \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \equiv \sigma \quad (8)$$

즉 캐비테이션 수( $\sigma$ )가 음의 압력계수(- $C_p$ )보다 작은 지점에서 공동이 발생된다. 유입유동의 유선(stream line) 상에서의 압력이 일정하다면 공동의 길이는 유한하며 이는 캐비테이션 수에 따라 달라진다고 할 수 있다. 본 해석법에서는 공

동의 초기 형상을 가정하고 반복계산을 통해 주어진 경계조건을 만족하도록 하는 초월공동의 최종 형상을 찾아낸다. 즉 초기 가정된 공동형상의 표면 압력을 계산하여 캐비테이션 수와 비교하고, 그 값이 수렴할 때까지의 형상 변화를 반복적으로 계산하여 결정한다.

### 3. 수치해석법의 이산화

경계치 문제에 있어, 소스(source)와 다이폴(dipole)에 의해 유기되는 속도 포텐셜은 식 (9)와 (10)과 같이 표현된다.

$$\phi_s = \int \frac{q(s)}{2\pi} \log r ds \quad (9)$$

$$\phi_D = \int \frac{\mu(s)}{2\pi} \frac{\partial \log r}{\partial n} ds \quad (10)$$

여기서  $\bar{r} = \bar{x} - \bar{\xi}$ ,  $r = |\bar{r}|$ 는 계산점에서 특이점까지의 거리를 의미하며,  $q(\bar{\xi})$ ,  $\mu(\bar{\xi})$ 는 각각 소스 및 다이폴의 세기를 의미한다.

Green의 1차 및 2차 정리를 이용하면 유기되는 속도 포텐셜은 식 (11)과 같은 적분방정식으로 표현된다.

$$\phi_x = U_\infty \cdot x + \int_{S_B + S_C} \frac{\mu(s)}{2\pi} \frac{\partial \log r}{\partial n} ds + \int_{S_C} \frac{q(s)}{2\pi} \log r ds \quad (11)$$

유기되는 접선속도( $v$ )의 수직 성분은 식(12)와 같이 유입속도와 공동 두께에 대한 1차 도함수로 표현이 가능하다.

$$v = U_\infty \frac{dt_c}{ds} \quad (12)$$

식 (12)를 적분하여 공동의 두께를 계산가능하며, 이를 이용하여 식 (13)과 같이 공동의 마감조건으로 사용한다.

#### 4. 캐비테이션 터널 실험연구

$$t_c(l) = \int_0^s \frac{q(s)}{U_\infty} ds = 0 \quad (13)$$

식 (11)의 적분방정식은 식 (14)과 같이 이산화 된 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_i = U_\infty \cdot x_i + \sum_{j=1}^{N_D} \frac{\mu_j}{2\pi p_j} \int \frac{\partial \log r}{\partial n} ds \\ + \sum_{k=1}^{N_S} \frac{q_k}{2\pi p_k} \int \log r ds \\ i = 1, 2, 3, \dots, N_D \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $N_D, N_S$ 는 다이폴과 소스가 분포된 표면의 패널수를 의미한다.

각 패널에서의 다이폴 및 소스의 세기는 일정하다고 가정하며, 물체의 뒤쪽 끝(trailing edge)에서 시작되는 공동표면의 형상은 유선은 물체 형상의 기울기와 같은 값을 갖는다고 가정하다. 결과적으로 물체의 후류에 위치한 소스의 세기를 계산할 수 있으며, 식 (14)는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} 0 = \phi_i = U_\infty \cdot x_i + \sum_{j=1}^{N_D} \frac{\mu_j}{2\pi p_j} \int \frac{\partial \log r}{\partial n} ds \\ + \frac{q_1}{2\pi p_1} \int \log r ds + \frac{q_{N_S}}{2\pi p_{N_S}} \int \log r ds + \sum_{k=2}^{N_S-1} \frac{q_k}{2\pi p_k} \int \log r ds \end{aligned} \quad (15)$$

위에서 기술된 정식화 과정을 축대칭 물체에 적용하여 계산을 수행하였으며, 이 경우 특이점의 수는 반으로 줄어들게 된다. 먼저 다이폴과 소스의 크기가 계산되면, 식 (13)을 이용하여 공동의 두께를 계산하고 이를 전 단계 공동의 두께에 반영한다. 특이점은 새롭게 생성된 공동표면에 분포되며 위의 과정을 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 수행하여 최종 공동형상을 계산한다.

이론해석법에서 적용한 축대칭 캐비테이터에 대해 캐비테이션터널 실험을 수행하여 발생하는 초월공동을 관측하였다. Fig. 2는 실험을 수행한 충남대학교 선박해양공학과와 캐비테이션터널을 보여주며, 터널의 주요성능은 Table 1에 나타내었다. Fig. 3은 터널에 설치된 캐비테이터(길이, 68.7 mm, 두께 18.1 mm)를 보여준다.



Fig. 2 CNU high speed cavitation tunnel

Table 1. Specification of the cavitation tunnel

Size (L x H)	6.8m x 2.0m	Speed (max)	15m/s
Section (D x B)	120mm x 50mm	Cav. No.	0.4~5.0
Pressure (min)	10kPa	Pressure (max)	300kPa

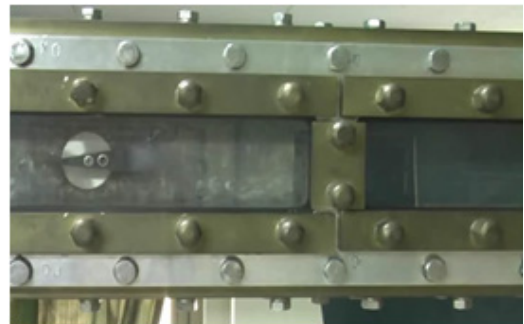


Fig. 3 Test section of the cavitation tunnel

## 5. 결과 및 분석

Figure 4는 본 이론해석법의 전형적인 계산결과로, 캐비테이터 및 공동 표면에서의 속도와 압력분포를 보여준다. 이는 쐐기 각이 15도인 캐비테이터에 대한 결과로, 캐비테이션 수 0.27에서 캐비테이터 길이의 두배에 해당하는 초월공동이 발생하고 있음을 알 수 있다.

이차원 쐐기와 같은 축대칭형 물체에 대한 초월공동의 길이에 대한 엄밀해[1]가 존재하며, 본 해석법을 통해 계산된 초월공동의 길이와 비교하였다(Fig. 5).

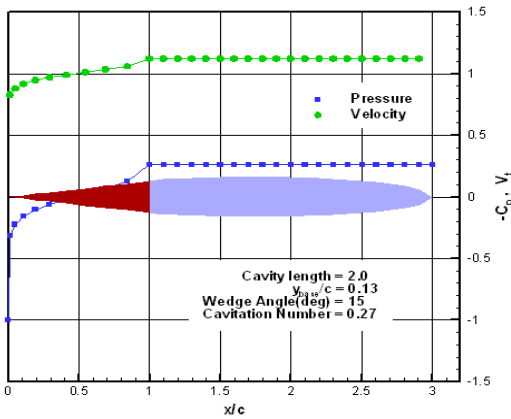


Fig. 4 Typical result of the present method

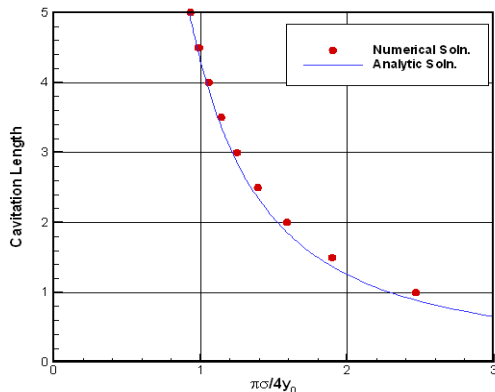
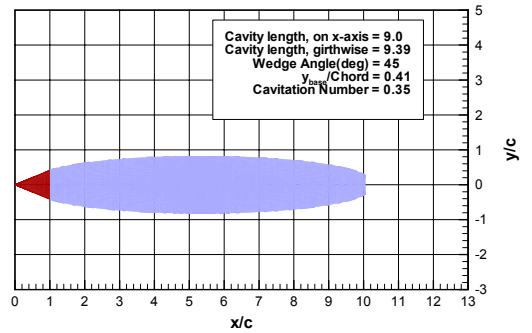


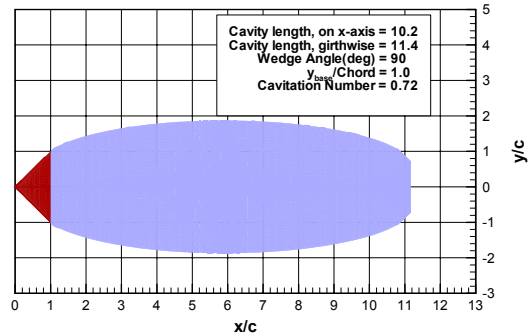
Fig. 5 Comparison of cavity lengths between analytic and numerical solutions for a wedge described in Figure 4

엄밀해와 비교적 잘 일치하고 있으며, 초월공동 길이가 길어질수록 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉 초기 발생 시(짧은 공동길이)에는 상대적으로 비정상(unsteady) 특성이 많이 존재하기 때문이다.

Figure 6은 쐐기 각이 45도와 90도를 가지는 형상(상대적으로 날씬한 물체와 뚱뚱한 물체)에 대해 계산된 초월공동의 특성을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 6 Predicted cavity shapes for different bodies: (a) wedge angle: 45 degree, (b) wedge angle: 90 degree.

Figure 7은 캐비테이션 수를 0.67부터 0.23까지 변화시켜 가면서 발생하는 초월공동을 계산(좌측)하고 실험결과(우측)와 비교하였다. 초월공동은 캐비테이터 길이의 0.5에서 2.5배 길이로 발생되었으며, 실험을 통해 관측된 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

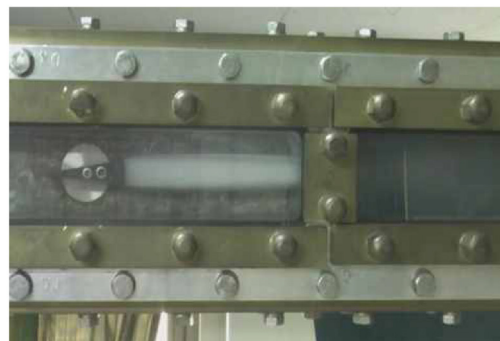
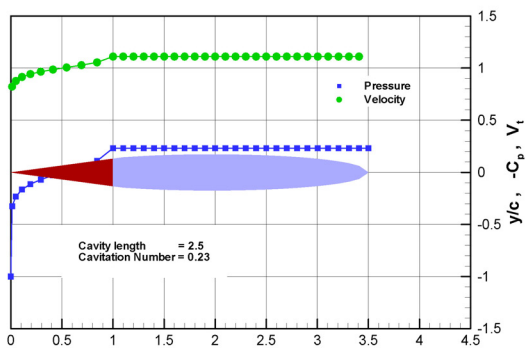
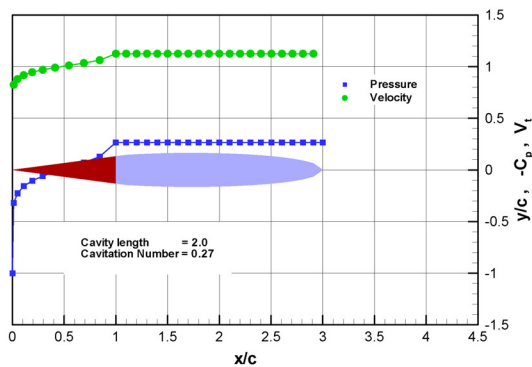
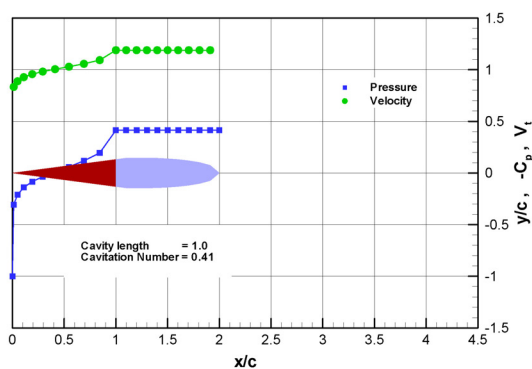
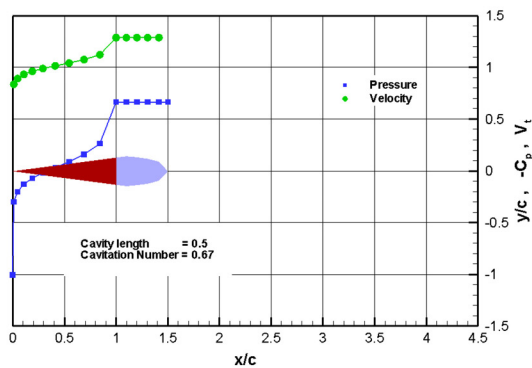


Fig. 7 Predicted (left column) and observed (right column) cavity growth

## 6. 결 론

본 연구를 통해 캐비테이터 주위의 초월공동 유동에 대한 이론 해석기법을 개발하였다. 캐비테이션 수에 따라 발생하는 초월공동의 길이와 캐비테이터 주위의 압력과 유속분포를 계산할 수 있음을 보였다. 계산결과는 먼저 엄밀해가 존재하는 경우와 비교하여 본 해석법의 신뢰성을 검증하였다. 또한 캐비테이션 터널 실험을 통해 발생하는 초월공동을 관측하고 이론해석 결과와 비교하였다.

초월공동 어뢰를 설계함에 있어, 공동을 생성 시키고 초월공동으로 발달시키는 중요한 역할을 하는 것이 캐비테이터이다. 본 연구를 통해 개발된 이론해석법과 실험법은 다양한 형상을 가지는 캐비테이터의 초기설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원(초공동 수중 운동체 통합연구, 09-01-05-26)으로 수행되었음

## 참 고 문 헌

1. Alyanak, E., Venkayya, V., Grandhi, R. and Penmetsa, R., 2004, "Variable Shape Cavitator Design for a Supercavitating Torpedo," Proceeding of 10<sup>th</sup> AIAA / ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, New York.
2. Kirschner, I. N., Uhlman, J.S., Varghese, A.N. and Kuria, I.M., 1995, "Supercavitating projectiles in axisymmetric subsonic liquid flows," American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division, Vol.210, pp.75-93.
3. Kunz, R.F., Boger, D.A., Chyczewski, T.S., Stinebring, D.R, Gilbeling, H.J. and Govindan, T.R., 1999, "Multiphase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies," Proceeding of FEDSM9, 3<sup>rd</sup> ASME / JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, CA, USA.
4. Lee, C.-S., 1989, A Potential-base Panel Method for the Analysis of a 2 dimensional Cavitating Hydrofoil, College of Engineering, CNU, Deajon, Korea, 1989.
5. Uhlman, J.S., 1989, "The Surface Singularity of Boundary Integral Method Applied to Supercavitating Hydrofoils," J. of Ship Research, Vol. 33, pp.16-20.
6. Yang, C. and Jesup, S., 1988, "Benchmark Analysis of a Series of Propellers with a Panel Method", Proceeding of SNAME propeller 1988 Symp., Virginia Beach, VA, pp. 1-10.
7. Newman, J. N., 1977, Marine Hydrodynamics, The MIT Press, Cambridge. 1977.
8. Kreisel, G. 1946, Cavitation with Finite Cavitation Number, Admiralty Res. Lab. Rept. No. R1H/26, 1946.
9. Wu, T. Y., 1972, "Cavity and Wake Flow", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.4, pp. 243-284.