

# 몸체 형상이 수중운동체의 공동 발달과 항력특성에 미치는 영향에 대한 수치적 연구

김형태<sup>†</sup> · 강경태<sup>1</sup> · 최정규<sup>2</sup> · 정영래<sup>3</sup> · 김민재<sup>3</sup>  
충남대학교 선박해양공학과<sup>1</sup>  
목포대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>  
국방과학연구소<sup>3</sup>

## A Numerical Study of Effects of Body Shape on Cavity and Drag of Underwater Vehicle

Hyoung-Tae Kim<sup>†</sup> · Kyung-Tae Kang<sup>1</sup> · Jung-Kyu Choi<sup>2</sup> · Young-Rae Jung<sup>3</sup> · Min-Jae Kim<sup>3</sup>  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National University<sup>2</sup>  
Agency for Defense Development<sup>3</sup>

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.

The calculation of steady-state cavitating flows around Supercavitating Underwater Bodies (SUB's), which consist of a circular disk head (cavitator), a conical fore-body, a cylindrical middle-body and either a boat-tail or a flare-tail, are carried out. To calculate the axisymmetric cavitating flow, used is a commercial computational fluid dynamics code based on the finite volume method, Fluent. From the analysis of numerical results, the cavity and drag, affected by the fore-body and tail of the SUB's, are investigated. Firstly, the effect of the fore-body shape is investigated with the same disk cavitator and a cylindrical rear-body of fixed diameter. Then with the same cavitator and a fixed fore-body, the effect of the rear-body shape is investigated. Before the cavity generated by the cavitator covers the slant of fore-bodies sufficiently, the larger the cone angle of the fore-body (i.e., the shorter the slant length), the larger the drag and the slower the development of cavity. After the cavity covers the fore-body completely so that the pressure drag component of the body is vanished, the characteristics of drag-velocity curves are identical. Also, as the tail angle is bigger, the cavity generated by the cavitator is suppressed further and the drag becomes larger. The peak of the drag appears for the flare-tail, i.e., when the tail angle is positive(+). On the contrary, the trough of the drag appears for the boat-tail, i.e., when the tail angle is negative(-). When the tail angle is 5 degrees, the peak of the drag appears at the body speed of 80m/s and the value of the drag is 43% larger than that at the design speed of 100m/s. When the tail angle is -5 degrees, the trough of the total drag appears at 75m/s and that drag is 30% smaller than that of the cavitator, which means the rest of the body has a negative drag.

**Keywords** : Effects of body shape(몸체의 영향), Cavity(공동), Drag(항력), SUB's(초공동 수중운동체)

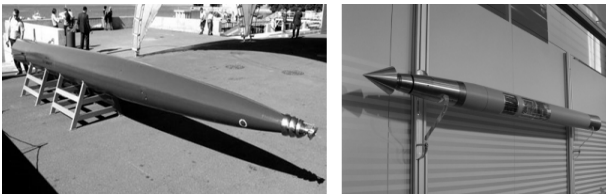
## 1. 서론

수중에서 운동하는 물체는 공기 중에서 같은 속도로 운동하는 물체에 비해 큰 항력이 작용하고, 속도가 증가할수록 항력이 급격하게 증가하기 때문에 매우 제한된 속도에서 운항해온 것이 사

실이다. 수중 운항 속도의 통상적인 한계를 극복하고 고속 운항이 가능하도록 하는 기술의 개발이 러시아, 독일, 미국, 중국 등을 중심으로 진행되고 있으며, 대표적 예로 초공동(또는 초월공동)을 이용한 고속화 기술이 있다.

초공동(super-cavity)을 이용한 수중운동체 고속화 기술은 몸체 머리에 캐비테이터(cavitator)를 장착하여 발생시킨 공동으로 몸

체를 완전히 감싸서 몸체 표면이 물과 직접 접촉하는 면적을 없애고 몸체 표면의 압력을 일정하게 해서 전체 항력을 감소시킴으로써 수중에서도 고속 운항이 가능케 하는 기술이다. 초공동을 이용한 수중운동체 고속화의 선두 주자로는 실용화되어 배치된 것으로 알려진 러시아의 고속 어뢰 Shkval(Fig. 1(a))이 있으며, 200노트 이상의 속도로 운항이 가능한 것으로 알려져 있다 (Kim & Nah, 2011). 일반 어뢰의 주행속도가 40노트 전후임을 감안할 때, 초공동 기술을 사용한 Shkval은 매우 빠른 속도로 주행함을 알 수 있다.



(a) Shkval(러시아) (b) Barracuda(독일)

Fig. 1 Prototypes of Shkval and Barracuda

Shkval의 실용화에 자극 받은 여러 나라에서 초공동을 이용한 수중운동체 고속화 기술에 대한 연구개발이 진행되고 있다.

그 대표적인 예로 독일 Diehl사가 개발한 것으로 알려진 Barracuda(Fig. 1(b))를 들 수 있으며, 수중에서 약 400노트의 운항속도를 달성했다는 미확인 정보가 공개되어 있다. 미국은 ONR(Office of Naval Research)를 중심으로 Shkval을 요격할 수 있는 수준의 초공동 어뢰를 연구해온 것으로 알려져 있고, 초공동 수중운동체에 관련된 연구 결과와 기초 자료가 꾸준히 발표되고 있다. 최근에는 초공동 수중운동체에 대한 중국 연구자들의 연구 결과가 많이 공개되는 것을 보면, 중국에서도 관련 연구가 활발히 진행되고 있는 것을 짐작할 수 있다.

초공동 고속 수중운동체를 개발하기 위해서는 초공동 발생 및 유지 기술 (Alyanak et al., 2004; Semenenko, 2001), 로켓추진 기술 (Foot et al., 1996; Miller & Herr, 2004), 유도제어 기술 (Ahn 2007; Balas et al., 2006; Park et al., 2016) 등 다양한 핵심기술이 집약되어야 한다. 이 기술들은 일반 수중운동체에 대한 기술과 차이가 많아서 기존의 기술을 적용하는데 한계가 있다. 이미 개발된 기술도 군사안보적 이유로 공개되지 않기 때문에 핵심기술에 관한 연구 결과 및 자료에 대한 접근이 극히 제한되어 있다.

앞서 언급한 핵심기술 중, 가장 기본적인 것이 몸체를 완전히 감싸는 공동을 발생시키고 유지하는 초공동 발생 및 유지 기술이다. 초공동을 발생시키는 캐비테이터와 깊은 수심에서도 초공동의 발생과 유지를 가능하게 하는 환기시스템(ventilation system)의 설계기술이 중요하며, 이에 덧붙여 공동의 발달과 항력 특성에 영향을 미치는 몸체 형상의 설계도 중요하다.

현재까지 알려진 연구 결과와 자료는 캐비테이터의 공동 발생과 항력 특성에 관한 것들 (Self & Ripken, 1955; Guzevsky, 1983; Ahn et al., 2012; Kim et al., 2015; Kim et al., 2016)이

대부분이며, 몸체 형상이 공동의 발달과 항력 특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 찾아보기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 원판 캐비테이터가 장착된 축대칭 수중운동체를 대상으로, 유한체적법 기반의 CFD 상용코드인 Fluent를 사용해서 속도 별로 정상 공동유동 계산을 수행하고, 계산결과를 해석하여 몸체 앞부분과 뒷부분의 형상이 공동의 발달과 항력 특성에 미치는 영향을 수치적으로 조사하였다.

본 연구를 통해 초공동 수중운동체의 몸체 형상이 공동 발달과 항력 특성에 미치는 영향에 대한 기초 자료를 얻고자 하며, 몸체의 영향을 고려하여 초공동 수중운동체의 캐비테이터를 보다 더 실제적인 조건에서 설계하는데, 본 연구의 결과가 도움이 되기를 기대한다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배 방정식 및 유동 모델

공동유동(cavity flows)을 수치해석하기 위하여 혼합유체(mixture fluid) 모델을 적용하면 지배방정식인 연속방정식과 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식은 식 (1), (2) 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m U_i^m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m U_i^m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m U_i^m U_j^m) \\ & = -\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_m \left( \frac{\partial U_i^m}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^m}{\partial x_i} \right) - \rho_m \overline{u_i^{m'} u_j^{m'}} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 혼합유체를 나타내며,  $U_i^m, u_i^{m'}$ 는 각각 혼합유체의 질량평균속도(mass averaged mean velocity), 질량평균변동속도(mass averaged fluctuating velocity)이며,  $\rho_m$ 은 혼합 밀도(mixture density)이다. 질량평균속도와 혼합 밀도는 각각 식 (3), (4)와 같다.

$$U_i^m = \frac{\sum_{q=1}^2 \alpha_q \rho_q U_i^q}{\rho_m} \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum_{q=1}^2 \alpha_q \rho_q, \quad \sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \quad (4)$$

여기서  $q$ 는 혼합유체 내에 존재하는 유체의 상이며,  $\alpha_q$ 는  $q$ 상의 체적분율(volume fraction)이다. 본 연구에서 상의 개수는 2개(물과 수증기)이며,  $\mu_m$ 은 점성계수로 다음 식 (5)와 같다.

$$\mu_m = \sum_{q=1}^2 \alpha_q \mu_q \quad (5)$$

$-\rho_m \overline{u_i^{m'} u_j^{m'}}$ 는 혼합유체유동에 대한 레이놀즈 응력(Reynolds stresses)으로서 Boussinesq 가정으로부터 식 (6)과 같이 레이놀즈 응력을 가정하고, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 realizable  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 구하였다. 여기서  $k$ 는 난류운동에너지이며, 물체 벽면 경계조건의 처리에는 표준 벽함수(standard wall function)를 사용하였다 (ANSYS, 2010).

$$-\rho_m \overline{u_i^{m'} u_j^{m'}} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i^m}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^m}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho_m k \delta_{ij} \quad (6)$$

한편, 상과 상 사이의 경계는 체적분율이 일정한 값(본 연구에서는 0.5)을 갖는 면으로 결정하며, 먼저 2차상(secondary phase)에 대한 체적분율 방정식으로부터 2차상의 체적분율을 구하고, 식 (4)로부터 1차상(primary phase)의 체적분율을 구한다. 2차상  $p$ 에 대한 체적분율 방정식은 다음 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_p \rho_p U_i^m) = \sum_{q=1}^2 (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (7)$$

공동유동을 해석하기 위해 수증기의 기화(vaporization)와 응축(condensation) 모델을 포함한 증기 수송방정식이 필요하며, 본 연구에서 사용한 증기 수송방정식은 식 (8)과 같다. Schnerr-Sauer 모델로 칭하는 식 (8)의 우변은 기화 압력(vapor pressure)에 대한 상대 압력에 따라서 기화 또는 응축하는 상변화를 모델링한 소스(source) 항이다 (ANSYS, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_v \rho_v U_i^v) = R_e - R_c \quad (8)$$

여기서  $v$ 는 증기의 상(vapor phase)을 나타내고,  $\alpha_v$ 는 증기의 체적분율,  $\rho_v$ 는 증기 밀도이며,  $U_i^v$ 는 증기의 속도이다.  $R_e$ 와  $R_c$ 는 캐비티 내의 증기와 액체 사이에서 각각 기화 및 응축을 나타내는 소스(source) 항이며, 액체 내부에서 단일 기포의 성장을 기초로 모델링한 Rayleigh-Plesset 방정식을 기본으로 하고 있다. 기화 및 응축 항은 유사한 방식으로 나타내며, 각각 식 (9) 및 (10)과 같다. 기화 압력  $p_v$ 를 기준으로 압력이 높고 낮음에 따라 적용 항이 판정되며, 계수  $A$ 와  $B$ 는 증기의 물성 및 증기 기포(bubble)의 크기와 관련된 계수로서 Table 1에 나타내었다.

$$R_e = A \cdot 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_v - p)}{\rho_l}}, \quad (p_v \geq p) \quad (9)$$

$$R_c = B \cdot 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p - p_v)}{\rho_l}}, \quad (p_v < p) \quad (10)$$

Table 1 Cavitation model constants

Cavitation model	Schnerr-Sauer
A	$\frac{\rho_l \rho_v \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho_m \mathfrak{R}_B}$
B	$\frac{\rho_l \rho_v \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho_m \mathfrak{R}_B}$
Bubble radius ( $\mathfrak{R}_B$ )	$\left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{3}}$

Table 1에서  $\mathfrak{R}_B$ 는 기포 반지름이고, 증기의 체적분율과 계수  $n$ 을 사용하여 계산하며, 체적분율은 식 (8)의 증기 수송방정식으로부터 구한다.

## 2.2 수치계산 방법

초공동 유동을 수치적으로 계산하기 위해 유한체적법(FVM) 기반의 상용코드인 FLUENT(ver. 15)를 사용하였다. 지배방정식의 확산항은 2차 중심차분, 대류항은 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics)방법으로 이산화하고, 속도-압력 연성은 SIMPLEC(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation Consistent) 방법을 사용하였다.

## 2.3 유동계산 방법의 검증

본 연구의 대상물체에 대한 공동유동 계산결과를 비교, 검증할 수 있는 실험 자료가 아직 없기 때문에, 이전 연구 (Lee et al., 2013; Kim et al., 2015)에서 동일한 수치계산방법을 사용해서 얻은 바 있는 원판 캐비테이터의 공동유동 계산결과를 실험 자료와 비교한 예를 인용함으로써, 수치계산방법의 타당성을 간접적으로 검증하였다.

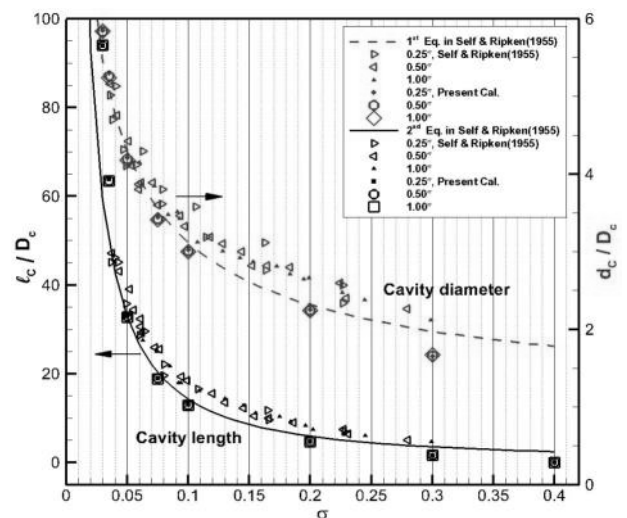


Fig. 2 Cavity length and diameter of disk cavitators

Fig. 2(Fig. 17 & Fig. 18 of Lee et al., 2013)는 직경( $D_c$ )이 서로 다른 3개의 원판 캐비테이터에서 발생하는 공동의 길이( $\ell_c$ )와 직경( $d_c$ )에 대한 계산 결과를 실험 자료와 비교한 것이다.

본 연구의 수치계산 방법이 공동의 길이와 직경을 비교적 정확하게 추정하는 것을 볼 수 있다. 특히, 공동수가 작을수록 실험 자료와 더 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

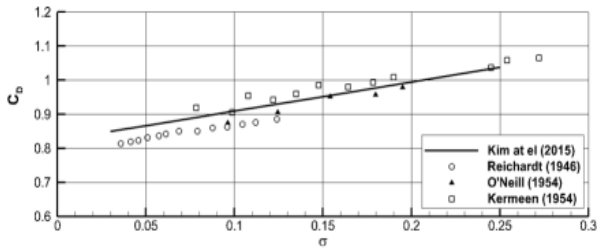


Fig. 3 Drag coefficients for disk cavitators

Fig. 3(Fig. 6 of Kim et al., 2015)은 초공동이 발생한 원판 캐비테이터 항력계수( $C_D$ )의 계산결과가 실험 자료와 잘 일치하는 것을 보여준다.

### 3. 수치해석 결과

문제를 단순화하기 위해, 원판 캐비테이터와 몸체 평행부의 직경을 고정된 상태에서, 먼저 전방 경사각(slant angle,  $\alpha$ )을 변화시켜서 몸체 앞부분의 영향을 조사한 다음, 전방 경사각 하나를 선정하고 몸체의 후미 경사각(tail angle,  $\beta$ )을 양의 값부터 음의 값까지 변화시키면서 몸체 뒷부분의 영향을 조사하는 방법을 채택하였다 ( $\alpha$ ,  $\beta$ 는 Fig. 4를 참조할 것).

#### 3.1 대상 물체

Fig. 4에 보인 바와 같이 수중운동체의 형상은 고정된 치수의 캐비테이터 직경 ( $D_c$ : 0.05m), 물체 길이 ( $L$ : 2.1m), 중앙평행부 직경( $D_B$ : 0.145m), 후미 길이( $L_T$ : 0.363m) 그리고 변수인 전방 경사각( $\alpha$ )과 후미 경사각( $\beta$ )으로 정의하였다. 전방두부 길이( $L_H$ )와 평행부 길이( $L_M$ )는 전방 경사각에 의해 결정된다. 한편, 원판 캐비테이터의 중심을 원점으로 잡고, 균일류  $U_0$ 의 방향을  $x$  축의 양의 방향으로, 반경 방향을  $r$ 의 방향으로 하여 기본 좌표계를 설정하였다.

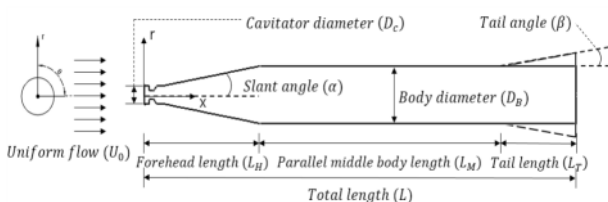


Fig. 4 Definition of coordinates and bodies

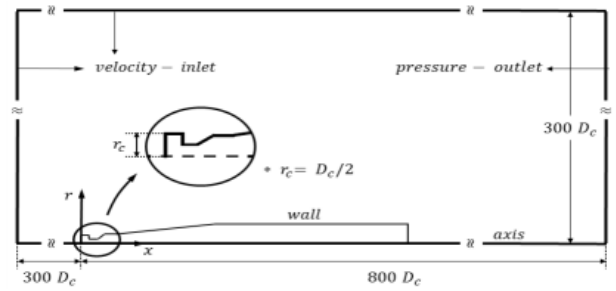


Fig. 5 Flow domain and boundary conditions

전체 유동을 축대칭으로 가정하고, Fig. 5와 같이 대칭축을 포함한 임의의 대칭면을 계산영역으로 설정하였다. 초공동이 가장 크게 발달한 속도에서도 수중운동체와 초공동에 의한 유동 교란으로 인해서 경계조건의 타당성이 훼손되지 않도록 계산영역을 충분히 크게 선택하였다.

유입경계는 캐비테이터 앞면의 중심에서 캐비테이터 직경( $D_c$ )의 300배, 유출경계는 800배, 외부경계는 300배로서 각각 상류, 하류, 반경 방향으로 떨어진 위치에 정하고, 유입경계와 외부경계에는 입구속도조건을, 유출경계에는 정압조건을 적용했다.

수치격자는 상용코드인 Gridgen을 사용하여 축대칭 유동계산에 적합하도록 2차원 정렬 격자(Fig. 6)로 생성하였고, 캐비테이터와 몸체의 침수표면에 이웃한 첫 격자점의  $y^+$ 는 레이놀즈수를 고려하여 대략 100으로 유지했으며 (Choi & Kim, 2010), 전체 격자수는 158,750개이다.

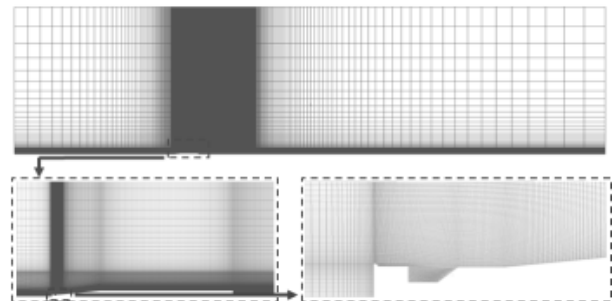


Fig. 6 Structured grids for axisymmetric supercavitating flow computation

Fig. 7은 25,000번의 반복계산을 통해 얻어진 공동유동의 전형적인 수렴 특성을 나타내며, 공동의 길이( $\ell_c$ )와 항력(Drag)이 충분히 수렴되었음을 알 수 있다. 5,000번까지의 계산은, 수렴 안정화를 위해 캐비테이션 모델을 적용하지 않아 캐비테이션이 발생하지 못한, 단상(single phase) 유동의 결과이다. 여기서, 항력 계수( $C_D$ )는 식 (11)과 같이 몸체 평행부의 단면적과 물의 밀도로 무차원화 하여 정의하였다. 본 연구의 모든 공동유동 계산은 동일한 반복계산 방식으로 수행된 것임을 밝혀둔다.

$$C_D = \frac{Drag}{\frac{1}{2} \rho_l U_0^2 \frac{\pi D_B^2}{4}} \quad (11)$$

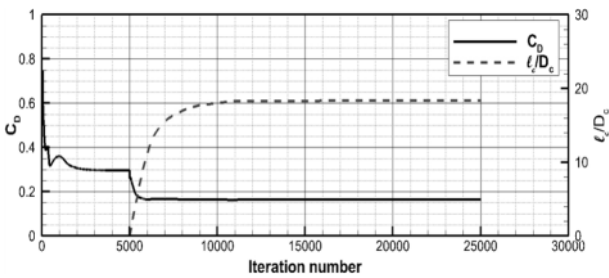


Fig. 7 Convergence of drag coefficient( $C_D$ ) and cavity length( $l_c$ )

### 3.2 유동 계산 조건

기준 압력(정압)은 111,111 Pa로 정하고, 20 ~ 120 m/s 범위에서 유입 속도 15개를 선정하여, 캐비테이션 수( $\sigma$ ) 0.015 ~ 0.541에 대해 공동유동을 계산하였다(Table 2). 캐비테이션 수는 식 (12)와 같이 정의한 것이다.

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho_l U_0^2} \quad (12)$$

Table 2 Conditions for cavity flow calculation

$U_0$ (m/s)	$\sigma$	$Re_{D_c} (\times 10^6)$
20	0.541	1.05
25	0.346	1.32
30	0.240	1.58
35	0.177	1.84
40	0.135	2.11
45	0.107	2.37
50	0.087	2.64
55	0.072	2.90
60	0.060	3.16
65	0.051	3.43
70	0.044	3.69
75	0.038	3.95
80	0.034	4.22
100	0.022	5.27
120	0.015	6.32

$p_0$ (Pa)	$p_v$ (Pa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )
111,111	3170.34	997.561	0.59531

### 3.3 몸체 전방 경사각 변화에 대한 결과해석

Fig. 8에 보인 것 같이 원판 캐비테이터와 몸체 평행부 직경을 고정한 상태에서 총 6개의 전방 경사각 (3° ~ 15°)을 선정하여 수행한 공동유동계산 결과를 해석해서, 몸체의 전방 경사부 형상이 공동의 발달과 항력 특성에 미치는 영향을 조사하였다.



Fig. 8 Configuration of supercavitating bodies with various slant angles

Fig. 9는 전방 경사각이 서로 다른 6개의 수중운동체에 대해 속도에 따른 항력의 변화를 나타낸다. 일반적으로 항력이 속도제곱에 비례하는 것을 고려할 때, 본 수중운동체의 속도-항력 곡선은 매우 다른 함수적 특성을 보인다.

수중운동체의 항력은 설계속도(100 m/s)에서 전방 경사각(경사부 형상)에 관계없이 약 8,300 N 정도이고, 경사각 변화에 의한 항력의 차이는 최대 900 N 정도로 60m/s에서 나타난다. 전방 경사각( $\alpha$ ) 변화에 의한 항력 차이는 65 m/s 이하의 속도에서 뚜렷이 나타나며, 그 보다 높은 속도에서는 항력 차이가 미미하다.

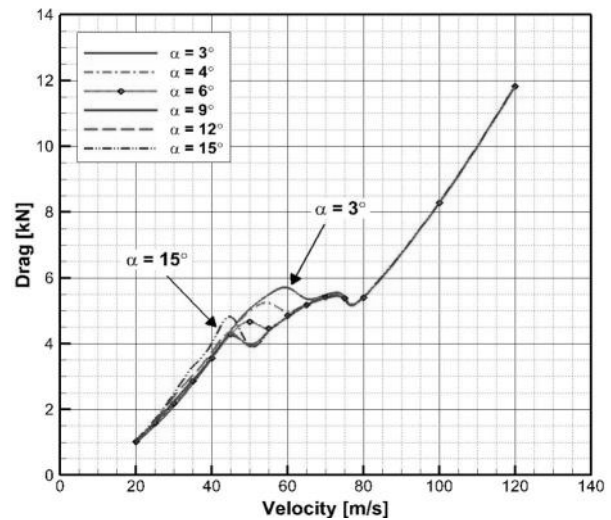


Fig. 9 Drag-Velocity curves for different slant angles

대략 35 m/s 이하의 속도 구간에서는 전방 경사각이 클수록(경사부가 짧고 뭉툭할수록) 항력도 커지며, 경사각이 15°인 물체의 항력이 가장 크다. 45 ~ 65 m/s 구간에서는 높은 속도에서 항력이 작아지는(속도가 증가하는데 항력은 오히려 감소하는) 특이한 점이 관찰된다. 이 같은 특징은 전방 경사각이 클수록 단계적으로 낮은 속도 구간에서 보이다가, 경사각이 9°~15°일 때는 거의 동일한 속도 구간(45 ~ 50 m/s)에서 관찰된다. 높은 속도에서 오히려 항력이 감소하는 것이나, 속도-항력 곡선이 전방 경사각에 따라서 상이한 특징을 보이는 것은 캐비테이터에서

발생한 공동이 물체의 전방 경사부를 감싸서 물체의 압력항력성분이 사라지기 때문이며, 뒤에서 더 자세히 분석, 검토하기로 한다.

캐비테이터에서 발생한 공동이 전방 경사면을 완전히 감싼 이후에는 경사부 형상과 무관하게 거의 동일한 속도-항력 특성을 나타낸다. 이는 경사부 뒤쪽의 물체 형상이 원기둥이고, 공동이 경사면을 감싼 이후에는 공동의 발달이 거의 같기 때문이다.

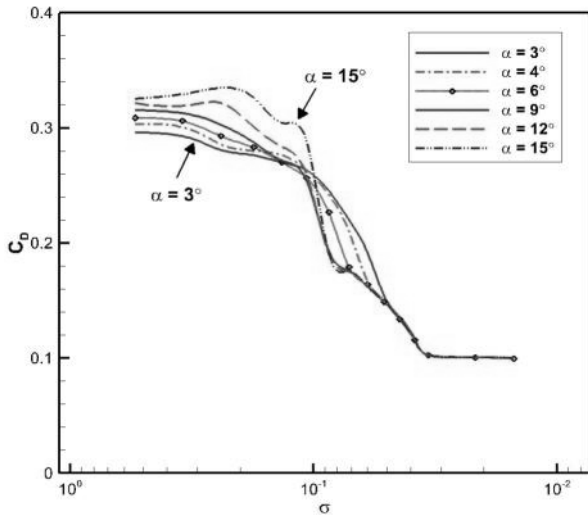


Fig. 10 Drag coefficient-cavitation number curves for different slant angles

Fig. 10은 캐비테이션수( $\sigma$ )에 따른 항력계수( $C_D$ )의 변화를 나타낸다. 속도-항력 곡선(Fig. 9)에 대해 살펴본 바와 같이  $\sigma$ 가 0.15보다 큰 낮은 속도에서 전방 경사각이 클수록 항력계수가 커지며,  $C_D$  값은 약 0.28 ~ 0.34 이다.  $\sigma$ 가 0.15보다 작아지면 경사각이 클수록  $C_D$ 가 더 급하게 감소해서  $C_D$ 가 더 작아지는 역전이 일어난다.  $\sigma$ 가 좀 더 작아지면 전방 경사각이 클수록 단계적으로 동일한  $C_D$  값으로 수렴하며,  $\sigma$ 가 0.044보다 작아지면 (속도 70 m/s 이상이면) 전방 경사각 모두 동일한  $C_D$  값을 갖는다.  $\sigma$ 가 0.034 이하에서는  $C_D$ 값은 0.10로 일정하며, 이 값을 캐비테이터 면적으로 무차원화 하면 0.84가 된다.

Fig. 11은 전방 경사각이 3°, 9°, 15°인 수중운동체에 대한 공동 발달 상태를 3개 속도(40, 70, 100 m/s)에서 비교하여 보여준다. 참고로 속도와 압력이 같고 물체가 없는 단독 상태에서 동일한 원판 캐비테이터에서 발생한 공동도 함께 나타내었다.

Fig. 11(a)로부터, 캐비테이터에서 발생한 공동이 전방 경사면을 조금 감싸는 수준으로 발달한 속도(40 m/s)에서는, 전방 경사각이 클수록 공동이 더디게 발달하여 공동의 크기가 더 작은 것을 알 수 있다. 단독상태의 캐비테이터에서 발생한 공동이 더 큰 것을 볼 때, 전방 경사각이 클수록 경사면 상류 쪽의 압력이 더 높아져서 공동의 발달이 더디진 것으로 판단된다. 하지만 경사각이 클수록 경사면이 짧아지고, 공동이 경사면을 감싼 길이의 경사면 길이에 대한 비율은 오히려 더 커져, 더 낮은 속도에서 공동이 경사면을 완전히 감싸는 것으로 나타났다.

한편, 경사면이 끝나는 물체 어깨에서 발생하는 얇은 공동은 전방 경사각이 3°일 때는 나타나지 않다가 경사각이 클수록 더 크게 발달하는 것을 볼 수 있다.

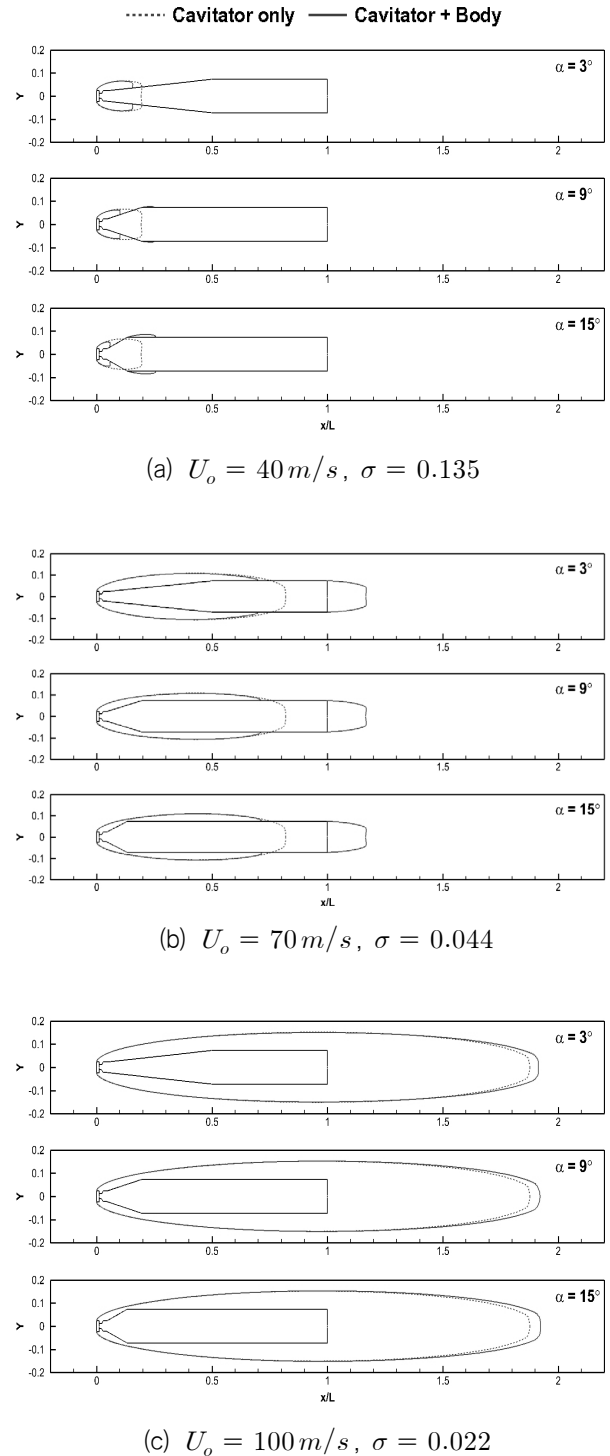


Fig. 11 Evolution of cavity shape with velocity for three different slant angles (3°, 9°, 15°)

Fig. 11(b)를 보면 공동이 물체의 전방 경사면을 충분히 감싸는 속도(70 m/s)에서는 경사각 모두의 공동이 유사한 수준으로

발달하여 공동 형상의 차이가 작아진 것을 볼 수 있다. 3개 경사각의 공동을 면밀히 비교해보면, 40 m/s 일 때 공동이 가장 크게 발달한 경사각 3°의 공동이 70 m/s에서는 가장 작은 것을 알 수 있다. 전방 경사각이 클수록 경사면에서 더디게 발달하던 공동이 몸체 어깨의 얇은 공동과 합쳐지면서 경사면을 덮어 감싼 다음에는 조금 더 빠르게 발달한 것이다.

여기서, 단독 상태의 캐비테이터에서 발생한 공동이 몸체 표면과 만나는 위치가 몸체 상에서 공동이 마감된 위치와 상당히 근사한 것을 주목할 필요가 있다.

Fig. 11(c)를 보면 공동이 몸체 전체를 충분히 감싸는 설계속도(100 m/s)에서는 전방 경사각에 따라서 달라지는 몸체 형상과 무관하게 동일한 공동이 발달함을 확인할 수 있다. 한편, 캐비테이터 단독상태 보다 더 큰 공동이 발생한 것은 몸체가 포함된 경우의 전체 항력이 조금 더 크다는 것을 의미한다.

Fig. 12는 캐비테이터 및 몸체 별 압력항력과 마찰항력성분의 속도에 따른 변화를 나타낸다. 공동이 몸체 전체를 감싸는 속도(80 m/s) 이상에서 몸체의 항력은 사라지며, 전체 항력이 캐비테이터의 항력과 거의 같아진다. 전방 경사각에 따라 경사면의 길이와 형상이 달라져도 몸체의 마찰항력성분은 차이가 없으며, 50 ~ 60 m/s에서 약 1,700 N으로 최대가 된다. 45 m/s 이하에서 전방 경사각이 클수록 몸체의 압력항력성분이 커지고, 45 m/s 이상이 되면 더 빨리 감소하여 사라진다. 전방 경사각이 15°일 때 40 ~ 50 m/s에서 약 1,900 N으로 최대치가 되며, 3°~ 6°인 경우 경사각이 클수록 최대치가 작아지고 9° ~ 15°는 경사각이 클수록 최대치가 커진다. 결국, 속도-항력 곡선의 차이는 몸체 압력항력성분 때문에 나타난다.

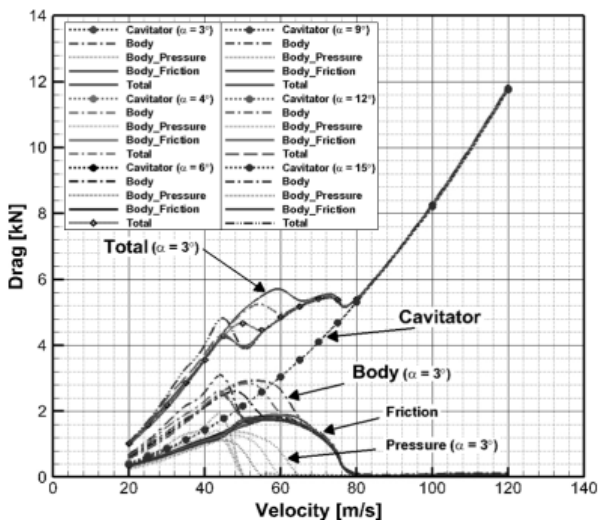


Fig. 12 Drag and various drag components of a cavitator and bodies with different slant angles

Fig. 9와 Fig. 11에 나타낸 결과에 대한 검토를 통해 이미 서술한 바와 같이, 전방 경사각이 3°인 경우에는 속도가 65 m/s

이상이면 캐비테이터에서 발생한 공동이 경사부를 감싸서 몸체의 압력항력성분이 사라지며, 동일한 매커니즘으로 경사각 4°인 경우는 60 m/s, 경사각 6°는 55 m/s, 경사각 9°~15°의 경우는 50 m/s 이상의 속도에서 압력항력성분이 사라지는 것을 Fig. 12의 몸체압력항력 곡선으로부터 확인할 수 있다.

이와 같이 전방 경사각이 클수록 압력항력성분이 사라지기 시작하는 속도(임계속도)가 낮아지며, 임계속도 보다 높은 속도에서는 경사각이 클수록 몸체 항력이 작아진다. 경사각이 9° 이상에서 임계속도는 거의 같으며, 임계속도 보다 낮은 속도에서는 전방 경사각이 클수록 몸체 항력이 더 커진다. 경사각 15°의 경우에는 9°, 12°에 비해서 항력의 피크가 상대적으로 크게 나타나는데, 이는 공동이 경사면 상에서 마감된 이후의 경사면에 높은 압력이 작용하기 때문으로 볼 수 있다. 40 ~ 60 m/s 속도 구간에서 몸체의 압력항력과 마찰항력성분이 합쳐져서 몸체 항력의 최대치(약 3,200 N)가 나타나고, 캐비테이터의 항력과 몸체 항력이 합쳐져서 속도-항력 곡선의 특성이 결정된다.

몸체의 전방 경사각이 캐비테이터에서 발생한 공동의 발달에 미친 영향과 발달된 공동이 경사부를 감싸는 정도에 따라서 변하는 몸체 압력항력성분을 더 자세히 검토, 확인하기 위해, 선택된 조건에서 수중운동체 주위의 공동 발달과 압력분포를 비교하여 Fig. 13과 Fig.14에 나타냈다.

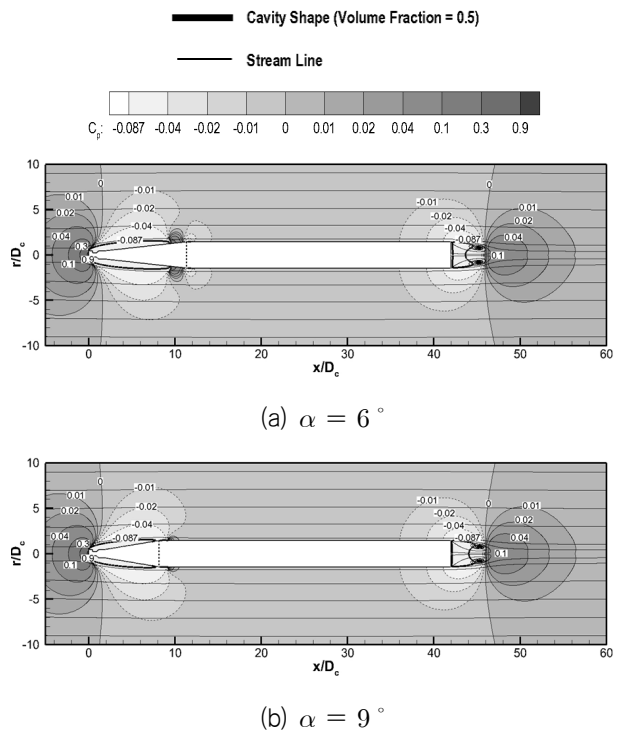


Fig. 13 Pressures, cavities and streamlines for two different slant angles ( $U_o = 50 m/s$ ,  $\sigma = 0.087$ )

Fig. 13은 몸체의 압력항력성분이 사라지는 현상(Fig. 12참조)

이 시작되는 50 m/s에서, 전방 경사각이 6°와 9°인 수중운동체 주위의 공동 발달과 압력분포를 비교하여 나타낸다.

경사각이 6°인 경우(Fig. 13(a))에는 경사면 상에서 공동이 마감되고 바로 뒤 경사면에 높은 압력이 발생한 것을 볼 수 있으며, 경사면에 작용하는 높은 압력 때문에 몸체 압력항력성분이 증가한다. 전방 경사각이 3°~6°인 경우에는 50 m/s 이하의 속도에서 모두 이와 같은 상황이 된다. 이에 반해 경사각이 9°인 경우(Fig. 13(b))에는 상대적으로 짧은 경사면을 공동이 거의 다 감싸고 경사면에 증기압이 작용하며 몸체의 압력항력성분이 거의 사라진다. 전방 경사각이 9°~15°인 경우는 대략 50 m/s 이상의 속도에서 이와 유사한 상황임을 확인하였다.

Fig. 14는 속도 60 m/s에서 전방 경사각이 3°와 4°인 경우를 비교하여 나타낸 것이다. 전방 경사각 3°의 경우(Fig. 14(a))는 앞서 살펴본 Fig. 13(a)의 경우와 마찬가지로 해석할 수 있고, 공동마감 뒤쪽의 경사면에 높은 압력이 작용해서 몸체 압력항력을 키운다. 반면에 경사각이 4°인 경우(Fig. 14(b))에는 공동이 전방 경사부를 완전히 감싸며, 공동마감 뒤의 압력회복으로 몸체 평행부에 높은 압력이 발생하지만 평행부의 압력은 몸체 항력에 기여하지 않는다. 전방 경사각 4°~15°의 경우는 모두 이와 같은 상황이 된다.

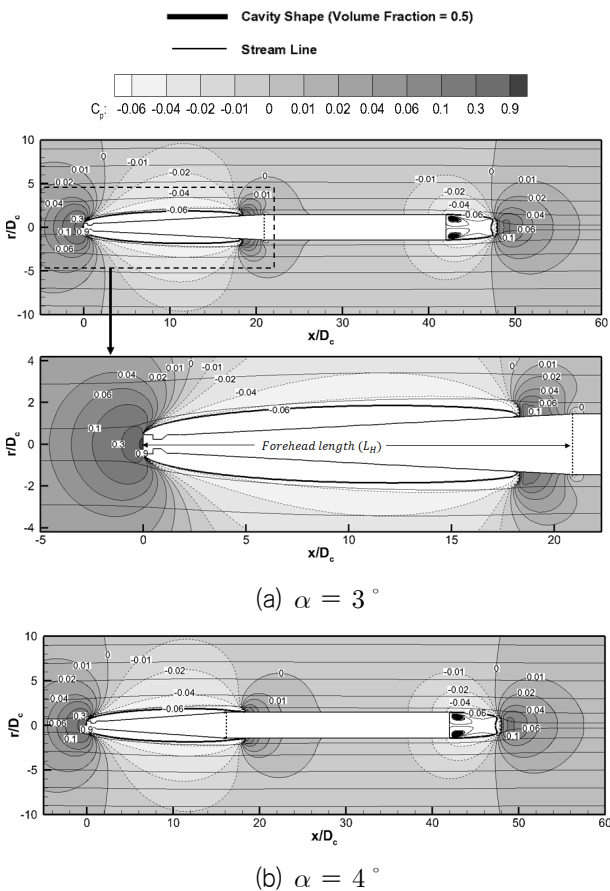


Fig. 14 Pressures, cavities and streamlines for two different slant angles ( $U_o = 60\text{ m/s}$ ,  $\sigma = 0.06$ )

### 3.4 몸체 후미 경사각 변화에 대한 결과해석

Fig. 15에 보인 바와 같이 총 7개의 후미 경사각( $0^\circ \sim \pm 5^\circ$ )을 선정하여 수행한 공동유동계산의 결과를 해석해서, 몸체의 후미 형상이 공동의 발달과 항력 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 항력 증가가 예상되지만, 후미 경사각이 양(+)인 경우를 포함시킨 이유는 후미가 공동 내벽과 접촉할 때, 주행 안정성을 갖는 것으로 알려져 있기 때문이다 (Ruggaber & Hinding, 2006).

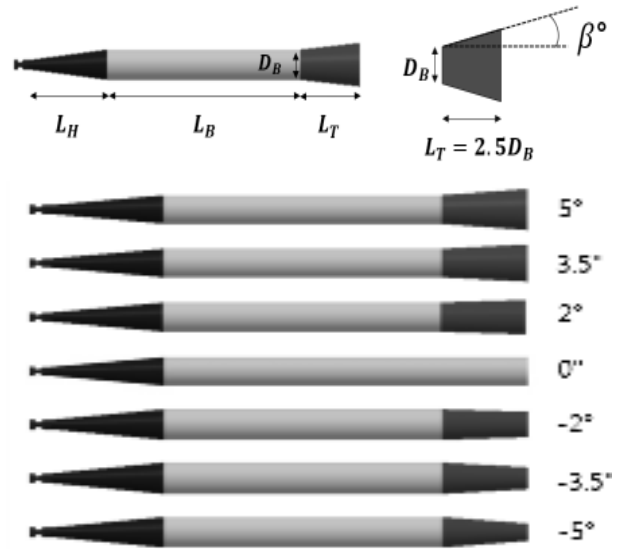


Fig. 15 Configuration of supercavitating bodies with various tail angles

Fig. 16은 후미 경사각이 서로 다른 7개의 수중운동체에 대해 속도에 따른 항력의 변화를 나타낸다. 후미 경사각이 작을수록(후미가 날씬하고 끝단 직경이 작을수록), 항력이 작아진다. 후미 경사각이 양(+)인 경우에는 120 m/s 이하의 모든 속도에서 경사각이 클수록(후미와 끝단의 직경이 커질수록) 항력도 커진다.

후미 경사각이 2°인 경우는 75 m/s, 경사각 3.5°는 77 m/s, 경사각 5°는 80 m/s 부근에서 항력피크(drag peak)가 나타나며, 속도가 피크 속도 보다 증가하면 항력이 급격히 감소하다가 다시 증가한다. 설계속도(100 m/s)에서의 항력은 후미 경사각 5°인 경우에 조금(약 300 N) 크지만, 대부분 8,200 N 정도이다. 그러나 후미 경사각이 양(+)인 경우에는 설계속도 보다 더 낮은 속도(75 ~ 80 m/s)에서 항력피크가 발생하고, 경사각이 3.5°와 5°인 경우에는 항력피크 값이 약 9,200과 12,000 N으로 설계속도에서의 항력(8,200 ~ 8,500 N) 보다 더 크게 나타난다. 이와 같이 첨예한 항력피크가 발생하는 것은, 캐비테이터에서 발생한 공동이 후미 경사면을 감싸기 전에는 경사면에 높은 압력이 작용하고 속도 제곱에 비례해서 몸체의 압력항력이 빠르게 증가하지만, 공동이 후미 경사면을 감싸면서 몸체의 항력이 급격히 감소하여 사라지기 때문이다.

한편, 후미 경사각이 0° 이하인 경우에는 경사각이 작을수록 항력이 작아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 80 m/s 이상의 속도



에서는 항력이 거의 같다. 주목할 점은 후미 경사각이  $0^\circ$ 보다 작은 경우 항력 골(dip)이 나타나는  $75 \text{ m/s}$ 에서 전체 항력이 캐비테이터의 항력(약  $4,700 \text{ N}$ , Fig. 19 참조) 보다 최대  $1,300 \text{ N}$  정도(30%)까지 더 작은 것이다. 이는 몸체에 상당한 크기의 음(-)의 항력이 작용함을 의미한다.

후미 경사각이 작을수록 항력이 작아지고, 후미 경사각의 부호에 따라서 항력피크 또는 항력 골이 나타나는 등, 속도-항력 곡선이 일관된 특징을 보이는 것은 후미 경사면과 몸체 끝단에 작용하는 압력 때문이다. 이에 대해서는 뒤에서 더 자세히 살펴보기로 한다.

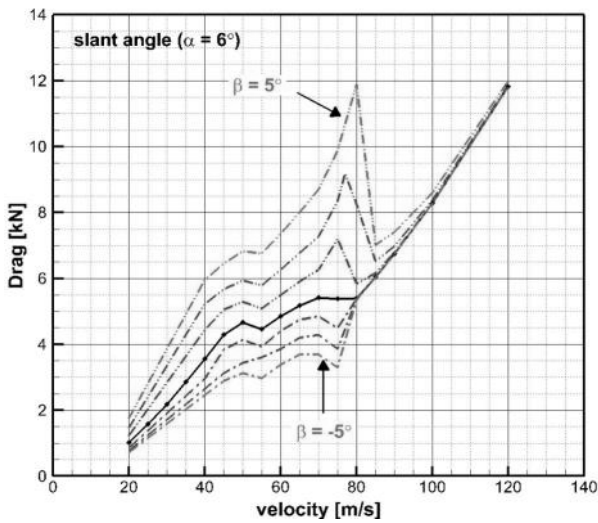


Fig. 16 Drag-Velocity curves for different tail angles

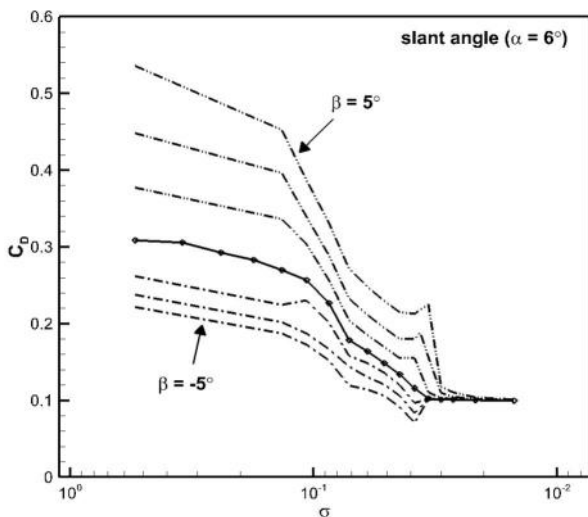


Fig. 17 Drag coefficient-cavitation number curves for different tail angles

Fig. 17은 캐비테이션수( $\sigma$ )에 따른 항력계수( $C_D$ )의 변화를 나타낸다. 후미 경사각이 작을수록  $C_D$ 가 작아지고  $\sigma$ 가 감소하면(속도가 증가하면)  $C_D$ 도 대체로 감소한다. 0.04보다 작은  $\sigma$

구간에서  $C_D$ 곡선의 피크 또는 골이 나타난 후에 일정한 값(원판 캐비테이터의  $C_D$ )으로 수렴한다. 이러한 항력곡선의 피크와 골은 Fig. 16에 보인 항력피크와 항력 골의 조건과 일치한다.  $\sigma$ 가 0.54(속도  $20 \text{ m/s}$ )일 때, 후미 경사각  $5^\circ$ 의  $C_D$ 가 0.54이고  $-5^\circ$ 의  $C_D$ 가 0.22이며, 그 차이가 무려 0.32이다.

Fig. 18은 후미 경사각이  $-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ$ 인 경우에 대한 공동 발달 상태를  $60$ 과  $70 \text{ m/s}$ 에서 비교하여 보여준다.

$60 \text{ m/s}$ 에서 후미 경사각이 달라져도 캐비테이터에서 발생한 공동은 거의 차이가 없다. 본 연구의 계산결과로부터,  $60 \text{ m/s}$  이하의 속도에서는 후미 경사각이 캐비테이터의 공동 발달에 미치는 영향이 매우 작은 것을 확인하였다.  $70 \text{ m/s}$ 에서는 후미 경사각의 영향으로 캐비테이터에서 발생한 공동이 작은 차이를 나타낸다. 특히, 후미 경사각이  $5^\circ$ 인 경우에는 캐비테이터에서 발생한 공동의 크기가 조금 작으며, 이는 후미 경사각이 클수록 상류 쪽의 압력이 더 높아져 나타난 결과이다. 속도가 증가하여 공동이 후미 경사면에 근접할수록 공동 발달이 지연되는 경향이 더 두드러지게 나타난다. 이에 반해서, 후미 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우는 캐비테이터의 공동이 경사각이  $0^\circ$ 인 경우에 비해 약간 크게 나타난다. 이는 후미 경사면 부근에서 유속이 빨라지면서 나타나는 낮은 압력의 영향으로 공동의 발달이 촉진된 결과이다.

후미 경사각이  $0^\circ$  이상인 경우에는 몸체 끝단에서 공동이 발생하며, 후미 경사각이 클수록 몸체 끝단의 공동이 더 크게 발생한다. 반면에, 후미 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우에는 경사면을 따라 유선이 모이고 압력이 높아져서 몸체 끝단에서 공동이 발생하지 않는다.

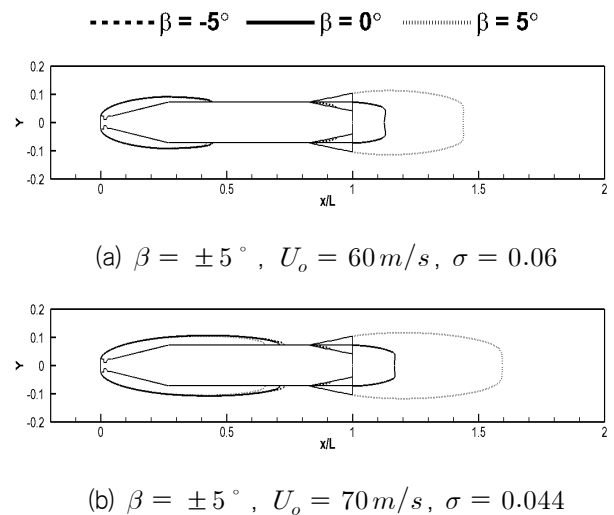


Fig. 18 Comparison of cavity shapes at two selected velocities for three different tail angles ( $-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ$ )

Fig. 19와 Fig. 22에는, 후미 경사각이 다른 7개 수중운동체를 경사각이 양(+)과 음(-)인 두 그룹으로 나누고, 캐비테이터와 몸체의 압력항력과 마찰항력성분에 대한 속도에 따른 변화를 나타냈다. 곡선들을 식별하기 쉽도록 전체 저항을 제외하였음을 밝혀둔다 (전체 저항은 Fig. 16을 참조).

Fig. 19로부터 물체의 후미 경사각이 0°인 경우는 공동이 물체 전체를 감싸는 80 m/s에서 물체의 항력이 사라지고, 경사각 2°의 경우는 약 90 m/s, 3.5°의 경우는 약 100 m/s, 5°의 경우에는 120 m/s 이상의 속도에서 물체의 항력이 사라지는 것을 알 수 있다.

실선으로 표시한 물체의 마찰항력성분은 대략 60 m/s 이하의 속도에서 거의 차이를 보이지 않다가, 60 m/s 이상의 속도에서는 후미 경사각이 클수록 마찰항력성분이 커지면서 확실한 차이를 나타낸다. 후미 경사면의 형상이 캐비테이터의 공동 발달에 미치는 영향이 작은 60 m/s 이하의 속도에서는 후미 경사각 변화에 따른 물체마찰항력의 차이가 거의 없다. 하지만 속도의 증가로 공동이 더 발달하여 후미 경사면에 가까이 접근하면, 후미 경사각이 클수록 공동의 발달이 더욱 억제(지연)되어서 물체 마찰항력이 커진다. 캐비테이터에서 후미 이전까지 형상이 동일하고 후미 길이가 일정하지만, 후미 경사각이 클수록 후미 경사부의 직경이 커지는 것을 고려하면, 이와 같은 물체마찰항력의 특징을 이해할 수 있다.

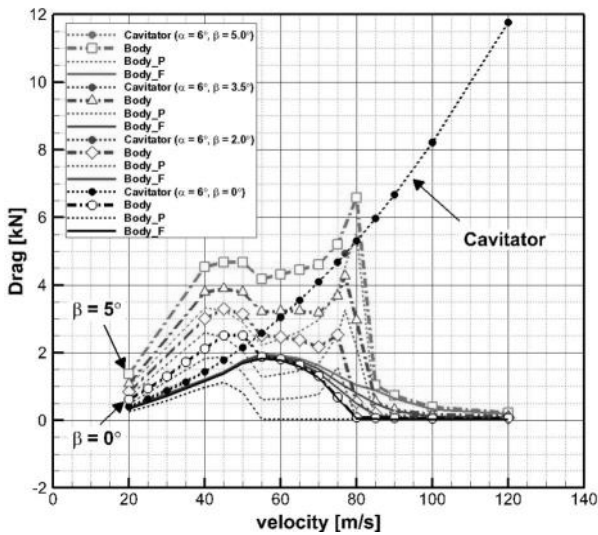
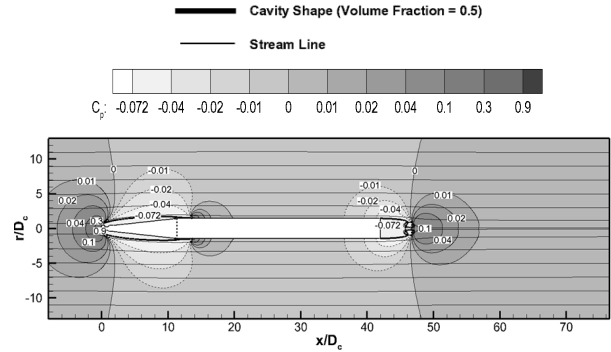


Fig. 19 Various drag components of cavitator and bodies with positive tail angles

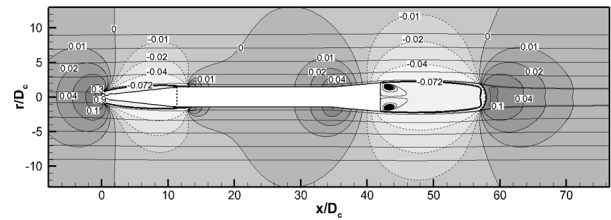
파선으로 표시한 물체 압력항력성분은 20 m/s을 시점으로 속도에 따라서 증가하고 대략 45 부터 55 m/s까지 감소한다. 경사각이 0°인 경우를 제외하면, 55 m/s 이상의 속도에서 물체 압력항력이 다시 천천히 증가하다가 대략 70 m/s부터, 후미 경사각 별 항력피크(Fig. 16) 속도까지 빠르게 증가하며, 항력피크 속도를 기점으로 급격히 감소하여 점차 사라진다. 이러한 물체압력항력 곡선의 특징은 후미 경사각이 양(+)인 그룹에 모두 적용된다. 후미 경사각이 0°인 경우에는 공동이 전방 경사면을 완전히 감싸는 55 m/s 이상의 속도에서 물체압력항력이 사라진다.

후미 경사각이 클수록 전체 속도 구간에서 후미 경사부의 압력항력이 증가하고, 캐비테이터에서 발생한 공동이 후미 경사면에 근접할수록 경사면의 높은 압력으로 인해 공동의 발달이 더

억제되어 경사면을 감싸지 못한 고속 구간에서 항력을 급격히 증가시킨다. 또, 물체를 완전히 감싸는 속도가 더 높아져서 결과적으로 물체 항력이 크게 증가한다.

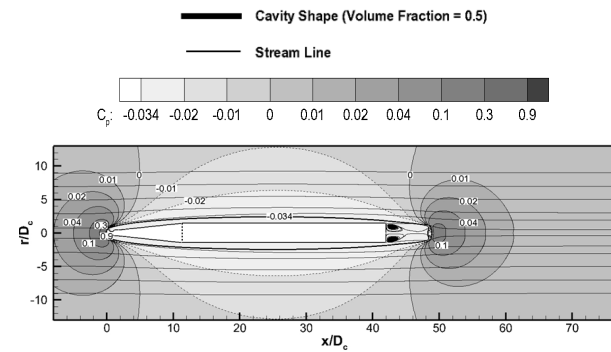


(a)  $\beta = 0^\circ$

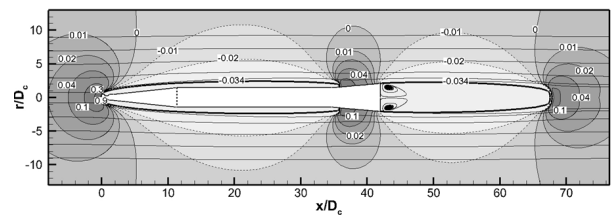


(b)  $\beta = 5^\circ$

Fig. 20 Pressures, cavities and streamlines for four different tail angles ( $U_o = 55 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 0.072$ )



(a)  $\beta = 0^\circ$



(b)  $\beta = 5^\circ$

Fig. 21 Pressures, cavities and streamlines for four different tail angles ( $U_o = 80 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 0.034$ )

Fig. 22에서는 곡선들을 식별하기 쉽도록 항력의 크기를 나타낸 세로축의 스케일을 이전과 다르게 2배로 늘린 것을 먼저 밝혀둔다. 심벌을 포함한 일점쇄선으로 표시한 몸체 항력 곡선으로부터, 후미 경사각이  $0^\circ$  이하인 경우에는 공동이 몸체를 완전히 감싸는  $80 \text{ m/s}$  이상의 속도에서 몸체 항력이 거의 0인 것을 알 수 있다. 하지만 더 주목할 점은 후미 경사각이 음(-)인 경우,  $80 \text{ m/s}$  이하의 일부 속도 구간에서 몸체의 항력이 음(-)의 값을 갖는다는 것이다.

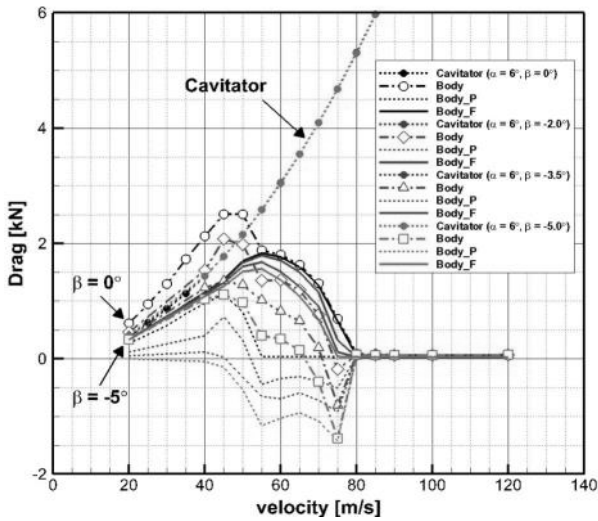


Fig. 22 Various drag components of cavitator and bodies with negative tail angles

실선으로 표시한 몸체 마찰항력성분은,  $40 \text{ m/s}$  이하의 속도에서는 차이가 거의 없고,  $40 \sim 80 \text{ m/s}$ 에서는 후미 경사각이 작을수록(절대치가 클수록) 마찰항력성분이 작아져서 차이가 나타난다. 또한 후미 경사각이 작을수록 몸체마찰항력이 사라지는 속도가 조금씩 낮아진다.

파선으로 표시한 몸체의 압력항력성분을 보면, 후미 경사각이  $0^\circ$ 인 경우에는 캐비테이터에서 발생한 공동이 전방 경사면을 완전히 감싸는  $55 \text{ m/s}$  이상의 속도에서 압력항력성분이 사라진 것을 알 수 있다. 후미 경사각이 음(-)인 경우에는 대략  $80 \text{ m/s}$  미만의 속도에서 경사각이 작을수록 몸체의 압력항력이 작아지며, 특히 주목할 점은, 경사각  $-2^\circ$ 의 경우는 대략  $52 \text{ m/s}$  이상,  $-3.5^\circ$ 인 경우는  $45 \text{ m/s}$  이상,  $-5^\circ$ 인 경우는 대략  $25 \text{ m/s}$  이상인 속도구간에서 음(-)의 몸체 압력항력이 나타난 것이다. 공동이 몸체를 완전히 감싸는  $80 \text{ m/s}$  이상의 속도에서 몸체의 마찰항력과 마찬가지로 압력항력도 거의 사라진다.

후미 경사각이 공동 발달에 미친 영향과 몸체 끝단의 공동 발달 상태에 따라서 달라지는 몸체의 압력항력을 더 자세히 검토, 확인하기 위해 선택된 조건에서 수중운동체 주위의 공동 발달과 압력분포를 비교하여 Fig.23과 Fig. 24에 나타냈다.

후미 경사각이  $0^\circ \sim -5^\circ$ 인 경우, 캐비테이터에서 발생한 공동이 후미 경사면에 근접할 만큼 발달하기 전까지는, 후미 형상이

캐비테이터에서 발생한 공동과 후미 상류의 압력분포에 미치는 영향이 거의 없기 때문에 후미 경사면 앞쪽의 몸체에 작용하는 압력항력성분은 차이가 없다. 하지만 속도  $55 \text{ m/s}$ 에서 후미 경사각  $0^\circ, -2^\circ, -3.5^\circ, -5^\circ$ 인 경우에 대한 몸체 후미와 끝단(base) 주위의 압력분포(Fig. 23)를 살펴보면, 후미 경사각이 작을수록 몸체 압력항력이 작아지는 주된 원인이 후미 경사면에서의 압력 회복과 몸체 끝단의 압력상승임을 확인할 수 있다.

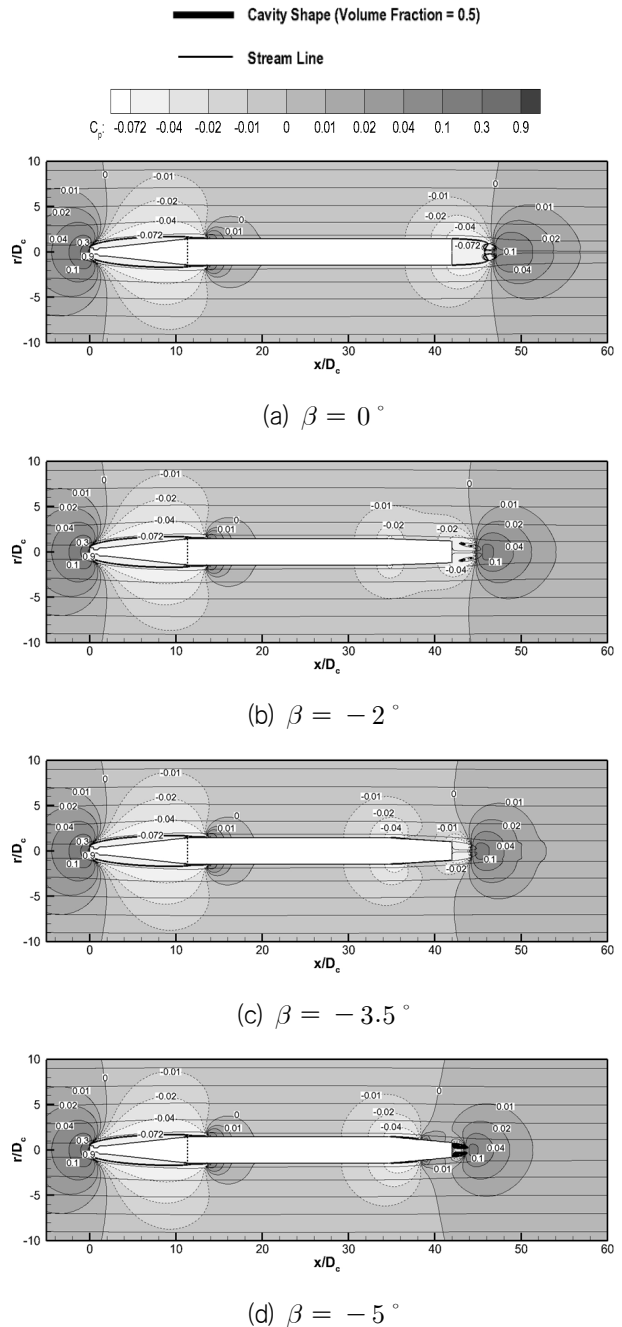


Fig. 23 Pressures, cavities and streamlines for four different tail angles ( $U_o = 55 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 0.072$ )

Fig. 24는 속도  $75 \text{ m/s}$ 에서 후미 경사각이  $0^\circ$ 와  $-5^\circ$ 인 수중

운동체 주위의 공동 발달 상태와 압력분포를 보여준다.

후미 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우에는 캐비테이터에서 발생한 공동이  $0^\circ$ 인 경우에 비해 더 길게 발달한다. 후미 경사각이  $0^\circ$ 인 경우에는 몸체 끝단에서 공동이 발생하지만, 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우에는 발생하지 않는다. 이처럼 후미 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우 공동의 발달 상태가 크게 달라진 것은, 후미 경사면 부근에서 유속이 가속되고 압력이 낮아져서 공동 발달이 촉진되고, 몸체 끝단에서 공동이 마감되면서 몸체 끝단의 압력이 높아지기 때문이다.

또한 후미 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우에는 몸체 끝단에 높은 압력이 작용하여 몸체의 압력항력성분이 크게 감소한 것과 달리, 경사각이  $0^\circ$ 인 경우에는 몸체 끝단에 증기압이 작용하고 공동마감 뒤쪽의 높은 압력이 몸체 평행부에 작용하여 몸체압력항력의 감소에 기여하지 못한 것을 알 수 있다.

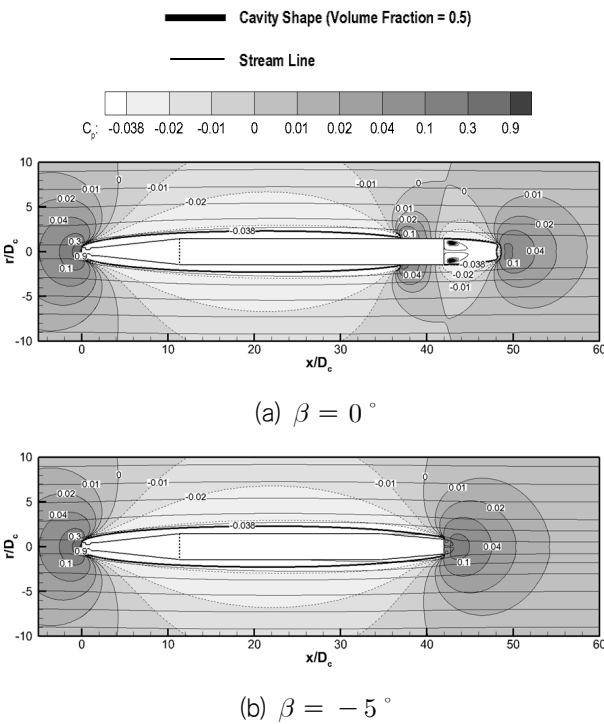


Fig. 24 Pressures, cavities and streamlines for two different tail angles ( $U_o = 75 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 0.038$ )

#### 4. 결론

원판 캐비테이터가 장착된 축대칭 수중운동체를 대상으로 전방 경사각( $\alpha$ )와 후미 경사각( $\beta$ )를 변화시키면서 정상 초공동 유동에 대한 수치계산을 수행하고 계산결과를 해석하여 몸체 형상이 공동 발달과 항력 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 전방 경사각이 클수록, 즉 경사부가 짧고 뭉툭할수록, 캐비

테이터에서 발생한 공동 발달이 천천히 진행되고 항력이 커지며, 공동이 경사면을 감싸서 몸체의 압력항력이 사라지기 시작하는 속도는 전방 경사각의 증가에 따라 단계적으로 낮아진다.

2. 캐비테이터에서 발생한 공동이 전방 경사면을 완전히 감싼 이후에는 경사부 형상과 무관하게 거의 동일한 속도-항력 특성을 보인다. 이는 경사부 뒤쪽의 몸체 형상이 원기둥이고, 공동이 경사면을 감싼 이후에는 공동 발달이 거의 같기 때문이다.

3. 전방 경사부의 형상은 캐비테이터에서 발생한 공동이 경사면을 완전히 감싸기 전까지의 속도 구간에서 공동의 발달과 몸체 항력, 특히 압력항력성분에 중요한 영향을 미치며, 초기가속 시 수중운동체의 속도 성능에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

4. 후미 경사각이 작을수록, 즉 후미가 날씬하고 끝단 직경이 작을수록 항력이 작아지며, 공동이 몸체를 모두 감싸게 되면 항력은 거의 같아진다.

5. 후미 경사각이 양(+)인 경우는 항력피크가 발생하고, 경사각이 클수록 항력과 피크속도가 단계적으로 높아진다.

6. 후미 경사각이 음(-)인 경우는 항력 골이 발생하고, 경사각이 작을수록 항력이 작아지며, 항력 골이 발생하는 속도는 큰 차이가 없다.

#### 후기

본 연구는 민군협력진흥원 민군기술협력 사업 (초공동 수중운동체의 몸체형상에 따른 유체력 특성 실험 연구, 2015-0138-01)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

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

Ahn, S.S., 2007. *An integrated approach to the design of supercavitating underwater vehicles*. Ph.D. Thesis. Atlanta, School of Aerospace, Georgia Institute of Technology.

Alyanak, E., Venkayya, V., Grandhi, R. & Penmetsa, R., 2004. Variable shape cavitator design for a super-cavitating torpedo. *Proceedings of 10th AIAA/ISSNMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, Albany, NY, USA, 30 August-1 September 2004.

- ANSYS 13.0, 2010. *User's guide, 2010*. SAS IP Inc: USA.
- Balas, G.J., Bokor J., Vanek, B. & Arndt, R.E.A., 2006. Control of high-speed underwater vehicles. *Control of Uncertain Systems*, LNCIS 329, pp. 25-44.
- Choi, J.K. & Kim, H.T., 2010. A study of using wall function for numerical analysis of high Reynolds number turbulence flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp. 647-655.
- Foot, J.P., Lineberry, J.T., Thompson, B.R. & Winkelmann, B.C., 1996. Investigation of aluminium particle combustion for underwater propulsion applications. *AIAA, ASME, SAE, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 32nd, Lake Buena Vista, FL, 1-3 July 1996.
- Guzevsky L.G., 1983. *Approximation dependencies for axisymmetric cavities past cones, Hydrodynamic flows and wave processes*. [in Russian], Institute of Thermal Physics, Sib. Branch, Acad. of Sci. of the USSR, Novosibirsk, pp.82-91.
- Kim, H.T., Lee, H.B. & Choi, J.K., 2015. Numerical analysis of the drag of conical cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(4), pp. 305-314.
- Kim, H.T., Kim, B.J., Choi, J.K. & Yoon, H.G., 2016. An estimation of the size of supercavities for conical cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(2), pp. 92-100.
- Kim, Y.G. & Nah, Y.I., 2011. Propulsion technologies of supercavitating rocket torpedo. *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers, Fall Conference*, Busan, Republic of Korea, 24-25 November 2011, pp.383-387.
- Lee, H.B., Kim, H.T. & Choi, J.K., 2013. Numerical analysis of supercavitating flows of two-dimensional simple bodies. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 50(6), pp. 436-449.
- Miller, T.F. & Herr, J.D., 2004. Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powder and water. *Proceedings of 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Fort Lauderdale, Florida, USA, 11-14 July 2004.
- Park, J., Kim, S.H. & Kim, N., 2016. Studies on planing avoidance control for a ventilated supercavitating vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(3), pp. 201-209.
- Ruggaber, W. & Hinding, W., 2006. *Barracuda-Guidance & Control of a super cavitating high speed underwater missile*. UDT Europe 2006.
- Semenenko, V.N., 2001. *Artificial supercavitation, physics and calculation*. Lecture Notes for RTO AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. Belgium, Rhode Saint Genese: Von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- Self, M.W. & Ripken, H.F., 1955. *Steady-State cavity studies in a free-jet water tunnel*. Minnesota: St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Report No. 47.

