

제어핀이 달린 수중 물체의 공동 수치해석

김형태[†] · 최은지¹ · 강경태¹ · 윤현걸²
충남대학교 선박해양공학과¹
국방과학연구소²

Numerical Analysis of the Cavitation Around an Underwater Body with Control Fins

Hyoung-Tae Kim^{1,†} · Eun-Ji Choi¹ · Kyung-Tae Knag¹ · Hyun-Gull Yoon²
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Agency for Defense Development²

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 evolution of the cavity and the variation of the drag for an underwater body with control fins are investigated through a numerical analysis of the steady cavitating turbulent flow. The continuity and the steady-state RANS equations are numerically solved using a mixture fluid model for calculating the multiphase turbulent flow of air, water and vapor together with the SST $k-\omega$ turbulence model. The method of volume of fluid is applied by the use of the Sauer's cavitation model. Numerical solutions have been obtained for the cavity flow about an underwater body shaped like the Russian high-speed torpedo, Shkval. Results are presented for the cavity shape and the drag of the body under the influence of the gravity and the free surface. The evolution of the cavity with the body speed is discussed and the calculated cavity shapes are compared with the photographs of the cavity taken from an underwater launch experiment. Also the variation of the drag for a wide range of the body speed is investigated and analyzed in details.

Keywords : Cavitation(공동 현상), Underwater body with control fins(제어핀이 달린 수중물체), Evolution of cavity(공동의 발달), Drag of underwater body with control fins(제어핀이 달린 수중물체의 항력)

1. 서론

초공동 수중운동체는 로켓에 의해서 추진되며, 머리에 장착한 캐비테이터(cavitator)에서 발생시킨 초월공동으로 몸통을 감싸고 마찰저항을 감소시켜서 수중에서 고속으로 주행할 수 있다. 이미 개발하여 배치된 것으로 알려진 초공동 수중운동체로는 러시아의 고속어뢰 Shkval(Kim & Nah, 2011)이 있고, 연구개발 중인 것으로는 독일의 Barracuda(Ruggaber & Hinding, 2006)와 미국의 Supercav가 있다. 이러한 초공동 수중운동체는 20노트 이상의 속도로 주행이 가능한 것으로 알려져, 일반 어뢰의 속도가 40노트 전후인 것에 비하면, 주행속도가 매우 빠른 것임을 알 수 있다.

Riabouchinsky(1919)의 선도적인 연구를 필두로 하여 1940년대에서 60년대에는 평판, 웨지 또는 원판, 원뿔 등에서 발생하는 2차원 또는 축대칭 물체의 초월공동에 대한 실험 및 포텐셜 유동

해석을 통한 연구가 수행되어 괄목할만한 성과를 거두었다. 이후에도 수중익선 및 고속 프로펠러의 날개를 중심으로 초월공동에 대한 연구가 지속되었으나, 그 외의 별다른 진전이 잘 알려지지 않은 가운데, 러시아는 초공동 고속 어뢰를 개발하여 실전 배치하는 독보적인 성과를 거두었다. 2000년대 이후부터는 CFD를 활용한 공동의 수치해석을 중심으로 발전하였고, 최근에는, 특히 환기 초월공동에 대한 기초 및 응용 연구가 활발하게 수행되어 왔다(Semenenko, 2001; Spurk, 2002; Vlasenko, 2003; Kinzel et al., 2009; Karn et al., 2016; Skidmore et al., 2017). 또한 미국, 러시아, 독일 뿐 아니라 중국, 이란 등에서도 초공동 수중운동체에 대한 연구(Wang, Huang & Wang, 2015; Zuo & Liu, 2015; Zuo et al., 2018; Rabiee et al., 2011; Saranjam, 2013)가 진행되고 있으며, 국내에서도 초월공동에 대한 기초연구(Ahn et al., 2012; Kim & Lee, 2014; Kim et al., 2015; Ahn et al., 2017)가 이루어지고 있다. 이와 같이 국내외에서 많은 연구가 진행되었으나, 그 대

부분은 웨지단면, 원판, 원뿔과 같은 단순한 형상에서 발생하는 초월공동에 대한 연구이다. 간혹 캐비테이터와 몸통을 함께 포함시켜 연구한 경우(Wosnik & Milosevic, 2005; Choi et al., 2015; Yuan & Xing, 2016; Kim et al., 2018)는 있지만, 몸통에 캐비테이터와 제어핀이 모두 달려있는 수중운동체의 초월공동에 대한 연구는 매우 드문 실정이다.

최근, 국내에서 초공동 수중운동체에 대한 기초 연구의 일환으로 수중주행실험을 수행하고 있다. 수중 물체의 머리에는 캐비테이터가, 몸통 끝부분에는 수직과 수평으로 각 2개씩 총 4개의 제어핀이 달려있다. Fig. 1은 수중주행실험이 수행되는 수조의 환경을 간략하게 보여주고 있다.

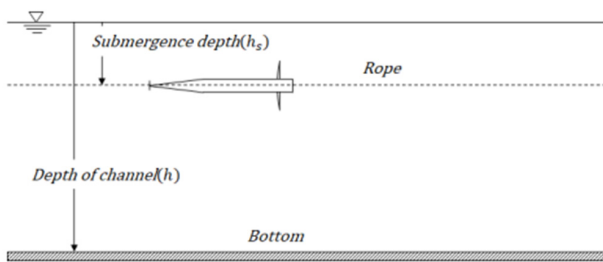


Fig. 1 Schematic view of test channel for underwater body

주행실험에서 수중물체는 로켓에 의해서 추진된다. 안전을 위해 수중물체의 중심축을 관통하는 구멍을 내고, 그 구멍을 관통하여 장력 조절이 가능한 가이드 로프를 매달아, 수중물체가 주행할 때, 임의의 방향으로 벗어나지 않도록 제한한다. Fig. 1에 보인 것 같이 개방된 수조에서 수중주행실험을 수행하여 얻어지는 실험 결과와 이에 관한 수치해석 결과는 고속 수중운동체의 개발을 위해 필요한 기초기술 및 기반기술 확보에 기여할 것이다.

본 연구에서는 국내의 수중주행실험에 사용한 수중 물체를 대상으로 실험 수심 및 속도 조건에서 정상 상태의 공동유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 주행실험의 환경을 실제로 가깝게 재현하기 위해 지배방정식에 중력장을, 그리고 유동 영역 안에 수면을 포함시켰으며, 얻어진 해석 결과로부터 각 속도 조건에서 수중 물체에 발생하는 공동 형상과 작용하는 항력을 조사, 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 3차원 초공동의 수치해석을 위해 비압축성, 혼합유체 모델(mixture fluid model)의 정상유동으로 가정하였다. 따라서 연속방정식과 RANS 방정식은 각각 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m U_i^m U_j^m) \\ &= -\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_m \left(\frac{\partial U_i^m}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^m}{\partial x_i} \right) - \rho_m \overline{u_i^m u_j^m} \right\} \\ & \quad + \rho_m g_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 m 은 혼합유체(mixture fluid)를 나타내며, U_i^m 와 u_i^m 는 각각 혼합유체의 질량평균 평균속도(mass averaged mean velocity)와 변동속도(mass averaged fluctuating velocity)이며, ρ_m 은 혼합 밀도(mixture density)이다. 질량평균 평균속도와 혼합 밀도는 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

앞에서 q 는 혼합유체 내에 존재하는 N 종의 유체를 구별하여 표시하며, α_q 는 각 유체의 체적분율(volume fraction)이다. 또 μ_m 은 혼합 점성으로 다음과 같이 표현된다.

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

식 (2)의 $-\rho_m \overline{u_i^m u_j^m}$ 는 혼합유체 유동에 대한 Reynolds 응력이다. 본 연구에서는 Boussinesq 가정에 기초하여 (6)과 같이 Reynolds 응력을 가정하고, turbulent eddy viscosity μ_t 는 2-방정식 모델인 SST $k-\omega$ 난류모델을 사용하여 계산하였다. 여기서 k 는 난류운동에너지로서 $(\overline{u^m u^m} + \overline{v^m v^m})/2$ 이며, 물체 벽면에서의 처리는 Reichardt의 혼합 벽법칙(blended wall law)를 사용하였다.

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

한편, 상(phase)과 상 사이의 경계는 체적분율로 결정하며, 이는 또한 혼합 밀도, 혼합 점성, 혼합 속도에 관계된다.

본 연구에 사용된 3종(물, 수증기, 공기)의 유체에 대한 체적분율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_w \rho_w U_i^m) = \dot{m}_{vw} - \dot{m}_{wv} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_v \rho_v U_i^m) = \dot{m}_{wv} - \dot{m}_{vw} \quad (7b)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_a \rho_a U_i^m) = 0 \quad (7c)$$

위 식에서 우변 항 $\dot{m}_{pq}$ 는 액체의 기화(vaporization) 또는 기체의 응축(condensation)에 의한 단위시간당 질량 전달을 나타내며, 아래첨자 w, v, a 는 각각 물, 증기, 공기를 의미한다. 캐비테이션의 수치해석을 위해서는 체적분율 방정식 뿐 아니라 증기에 대한 수송방정식도 함께 풀어야 한다.

2.2 캐비테이션 모델

본 연구에서는 Sauer의 캐비테이션 모델(STAR-CCM+ 9.02 User's Guide, 2014)을 사용하였다. 캐비테이션 해석을 위한 증기 수송방정식은 (8)과 같고, 우변은 기화 압력을 기준으로 절대압력(absolute static pressure)의 상대적인 고저에 따라서 기화(vaporization) 또는 응축(condensation)하는 상의 변화를 모델링한 소스(source)항이다.

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

여기서 v 는 증기의 상(vapor phase)을 나타내고, α_v 는 증기의 체적분율, ρ_v 는 증기의 밀도이며, U_i^v 는 증기의 속도이다. R_e 와 R_c 는 캐비테이션 내부의 증기와 액체 사이에서 각각 기화와 응축을 나타내는 소스(source)항이다. 기화 및 응축 항은 유사한 방식으로 표현되고, 식 (9) 및 (10)과 같이 표현되며, 기화 압력(vapor pressure) P_v 를 기준으로 압력이 높고 낮음에 따라 적용 항이 판정된다.

$$P_v \geq P \text{ 일 경우} \\ R_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \frac{\alpha_v(1-\alpha_v)}{\mathfrak{R}_B} 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}} \quad (9)$$

$$P_v < P \text{ 일 경우} \\ R_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \frac{\alpha_v(1-\alpha_v)}{\mathfrak{R}_B} 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P - P_v)}{\rho_l}} \quad (10)$$

증기 기포의 크기는 기포 반지름 $\mathfrak{R}_B = \left(\frac{\alpha_v}{1-\alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_0} \right)^{\frac{1}{3}}$ 의 관계식으로부터 결정하며, 이 때 증기의 체적분율은 식 (8)로부터 계산하고, 핵 밀도(seed density) n_0 는 $10^{12} m^{-3}$, 핵 직경(seed diameter)은 $10^{-6} m$ 로 하였다.

2.3 유동 해석 코드

유한체적법(FVM) 기반의 상용코드 STAR-CCM+ 9.02를 사용하여 수치계산을 수행하였다. 지배방정식의 확산항은 2차 중심차분, 대류항은 2차 상류차분으로 이산화하고, 체적분율의 계산에는 HRIC(High Resolution Interface Capturing) VOF(Volume of

Fluids) 방법을 사용하였다. Rhie & Chow의 압력방정식을 사용하였으며, 속도-압력 연성은 SIMPLE 방법을 사용하였다.

3. 수치해석 결과

먼저, 본 연구에서 사용한 공동유동의 수치계산 및 해석 방법을 검증하기 위해서 무한유동 조건의 원판(circular disk) 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 길이(ℓ_c)와 직경(d_c)에 대한 수치해석 결과를 Guzevsky(1973), Kim et al.(2015)의 추정공식과 Self & Ripken(1955), Semenenko(2001)의 실험 결과와 함께 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

수치해석 결과는 공동수에 대한 초월공동의 길이 및 직경의 변화를 비교적 근사하게 추정하며, 특히 공동수가 작을수록, 즉 초월공동이 크게 발달할수록 실험 결과와 더 잘 맞는 것을 볼 수 있다.

또한 Fig. 3은 초월공동이 발생한 원판 캐비테이터 항력계수(C_D)의 해석 결과가 Kim et al.(2015)과 Guzevsky(1973)의 추정공식은 물론, 실험 결과와도 매우 잘 일치하는 것을 보여준다. 여기서 항력계수는 $C_D = Drag / (0.5 \rho_l U_0^2 (\pi D_c^2 / 4))$ 로서 원판의 면적으로 무차원화 하여 정의하였다.

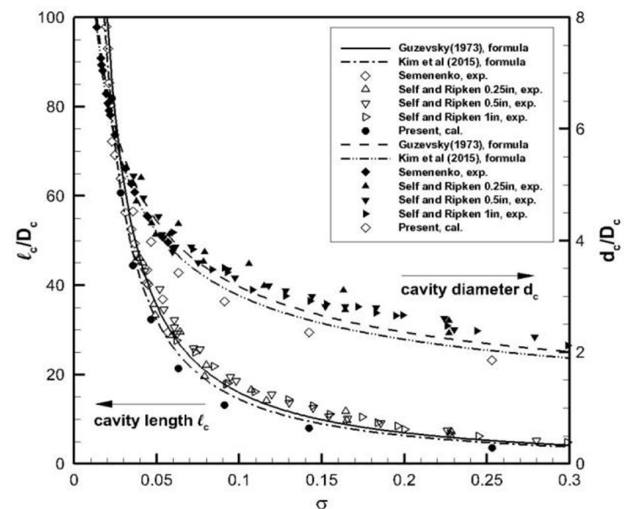


Fig. 2 Cavity lengths and diameters of the disk cavitator

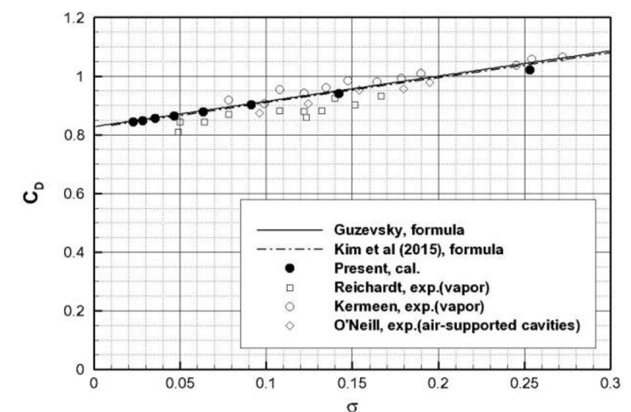


Fig. 3 Drag coefficients for the disk cavitator

3.1 대상 물체

수중물체의 전체 형상과 캐비테이터 및 웨지(wedge) 단면을 포함한 제어핀의 상세 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 원판 캐비테이터의 직경 D_c 로 무차원화 하여, 물체의 전체 길이 $l/D_c(45.7)$, 몸통 평행부의 직경 $D/D_c(3.30)$, 제어핀의 스패($l_f/D_c : 2.35$)를 정의하였다.

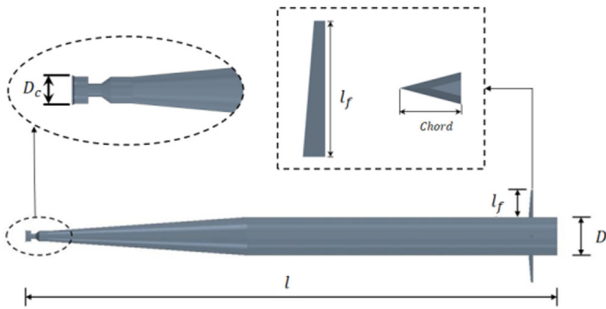


Fig. 4 Geometry of an underwater body

3.2 유동영역 및 경계조건

본 연구에서는 혼합 유체(mixture fluid) 모델을 이용하여 물, 수증기, 공기가 혼재된 다상 유동을 계산하였다. 수면을 유동영역 안에 포함시켜서 수면 아래에서 일정한 속도로 주행하는 수중 물체의 공동유동을 수치해석 하였다.

Fig. 5는 공동유동 계산에 사용된 좌표계와 유동영역을 나타낸다. 몸체 끝단(base)에서 수직 방향으로 정수면과 만나는 점을 좌표 원점으로 잡고 하류 방향을 x 축, 연직 상 방향을 z 축 그리고 수중물체의 우현 쪽을 y 축의 양의 방향으로 정하였다.

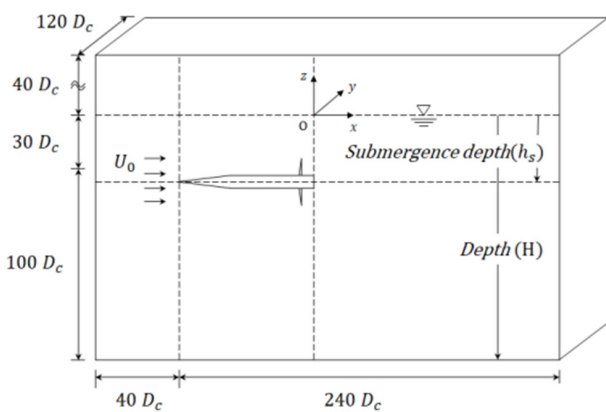


Fig. 5 Definition of coordinates and flow calculation domain

캐비테이터의 직경 D_c 를 단위로 할 때, 유입 경계는 캐비테이터 앞면으로부터 상류로 $40D_c$, 유출 경계는 캐비테이터 앞면에서 하류로 $240D_c$, 수면 위 대기의 경계는 물체 중심선에서 연직 상 방향으로 $70D_c$, 바닥 경계는 연직 하방으로 $100D_c$ 가 되도록 정하였다. 정수 면에서 캐비테이터의 중심까지 거리인 잠김 깊이(h_s)

는 $30D_c$, 정수 면에서 바닥 경계까지 거리인 전체수심(H)은 $130D_c$ 이다.

한편, 유동영역에 대한 경계 조건으로서, 유입 경계에는 균일속도 조건을, 유출 경계에는 절대압력 조건을, 상부의 대기와 하부의 물의 경계에는 균일속도 조건을 적용하였다. 전체 유동을 좌우 대칭으로 가정하고 대칭면을 기준으로 우측만 계산영역으로 선택하였으며, 대칭 조건을 사용하였다.

3.3 수치격자 및 유동계산조건

Fig. 6에 보인 바와 같이, 수치 격자로는 Star-CCM+에서 제공하는 prism layer를 포함한 trimmer mesh를 사용하였으며, 사용된 격자의 개수는 약 240만개이다. 수치해석 cases에 대한 조건은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

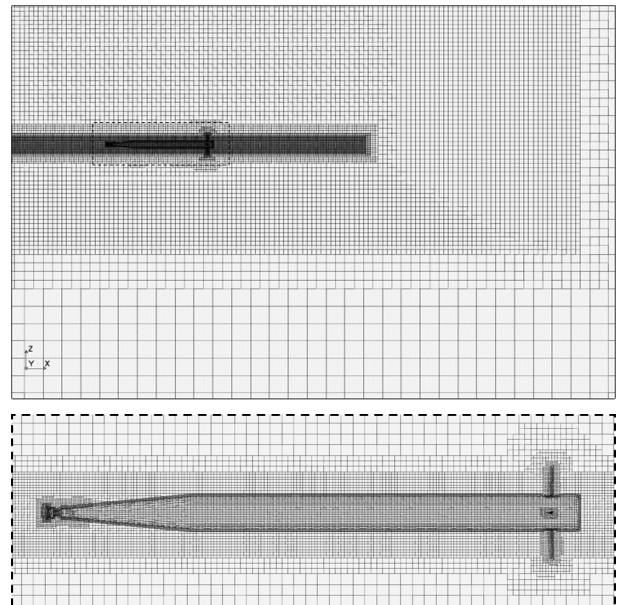


Fig. 6 Computational grid for calculating cavity flows around the underwater body

Table 1 Conditions for calculation of the cavity flows

$h_s [m]$	$g [m/s^2]$	$U_0 [m/s]$	σ
1.5	9.81	20	0.566
		30	0.251
		40	0.141
		60	0.063
		80	0.035
		100	0.023
		120	0.016

Table 1과 같이 물체의 잠김 깊이(h_s)가 정수면 아래 1.5m 인 조건에서, 총 7개 속도에서 계산을 수행하였다. 참고로, 각각의 속도에 해당되는 공동수를 함께 표시하였다.

3.4 속도에 따른 공동 발달

Fig. 7은 20 ~ 120 m/s 범위의 속도 7개를 선정하여 계산한 공동 형상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 물과 수증기의 체적분율이 0.5인 면을 공동 경계면으로 정의하였다.

속도 40 m/s 에서 공동 형상을 살펴보면, 캐비테이터에서 직경의 약 5배(물체 길이의 약 11%)의 공동이 발생하였고, 제어핀에서는 평균코드의 약 12배 정도의 공동이 계산되었다. 또 몸통의 직경이

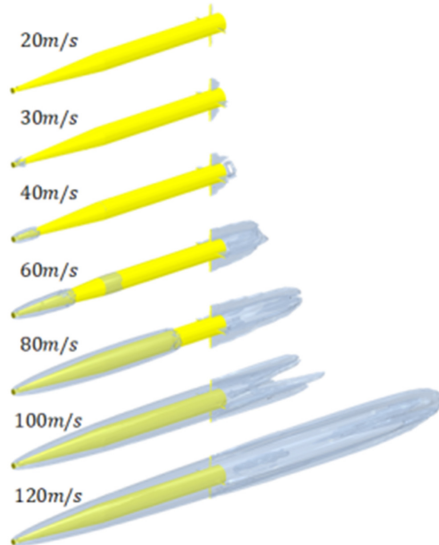


Fig. 7 Evolution of the cavity shape with the velocity of the underwater body



Fig. 8 Positions of constant x-planes for comparison of cross-section shapes of the cavity

일정해지기 시작하는 어깨에서도 얇은 공동이 발생되는 것을 확인하였다.

60 m/s 일 때, 몸통 어깨에서 공동이 더 길게 발달하고, 제어핀에서 발생한 공동이 몸통의 끝단에서 발생한 공동과 합쳐져서 발달한 것을 볼 수 있다.

속도 80 m/s 에서는 캐비테이터에서 발생한 공동이 어깨에서 발생한 공동과 하나로 합쳐져 몸통의 약 77%를 감싸 덮을 만큼 발달하지만, 아직 제어핀까지 도달하지 못한 것을 볼 수 있다.

속도가 100 m/s 에 이르면 캐비테이터의 공동이 몸통을 모두 감쌀 만큼 발달하는 것을 볼 수 있으며, 따라서 몸통의 항력이 거의 사라질 것이다. 이때, 제어핀의 하단 절반가량이 공동으로 덮여서 제어핀의 유효성도 약 절반으로 감소할 것으로 예상된다.

속도가 120 m/s 이상이면 제어핀을 대부분 감쌀 만큼 캐비테이터에서 발생된 공동의 직경이 커지고 길이도 길어지며 각 부분에서 발생한 공동들이 모두 합쳐진 초월공동으로 나타난다.

이상에서 살펴본 것과 같이 수중물체의 속도가 100 m/s 이상 되면 몸통을 모두 감쌀 만큼의 공동이 발달한다. 한편, 액침 길이는 몸통에 달린 제어핀이 공동 표면을 관통하여 공동 바깥쪽의 물속에 잠긴 깊이를 지칭하는데, 공동의 발달 정도에 따라서 제어핀의 액침 길이가 달라진다. 속도가 100 m/s 일 때는 액침 길이가 제어핀 스패(l_f)의 약 43% 정도이지만, 120 m/s 일 때는 약 25%로 줄어든다. 액침 길이가 짧아지면 제어핀의 성능이 그에 비례하여 저하되므로, 이에 대한 신중한 고려가 필요하다.

Fig. 7에 나타난 초월공동의 형상 중에서, 80 m/s 와 100 m/s 일 때, 초월공동의 단면 형상이 길이 방향으로 어떻게 변하는지 살펴보았다. Fig. 8에 표시한 a는 캐비테이터 중간 지점이고, b는 몸통의 직경이 일정해지기 시작하는 부분이다. 또 c와 d는 각각 제어핀 앞날 시작점과 뒷날 위치이며, e는 몸체 끝단에서 후방으로 전체 길이의 1% 떨어진 위치이고 f는 20% 떨어진 위치이다.

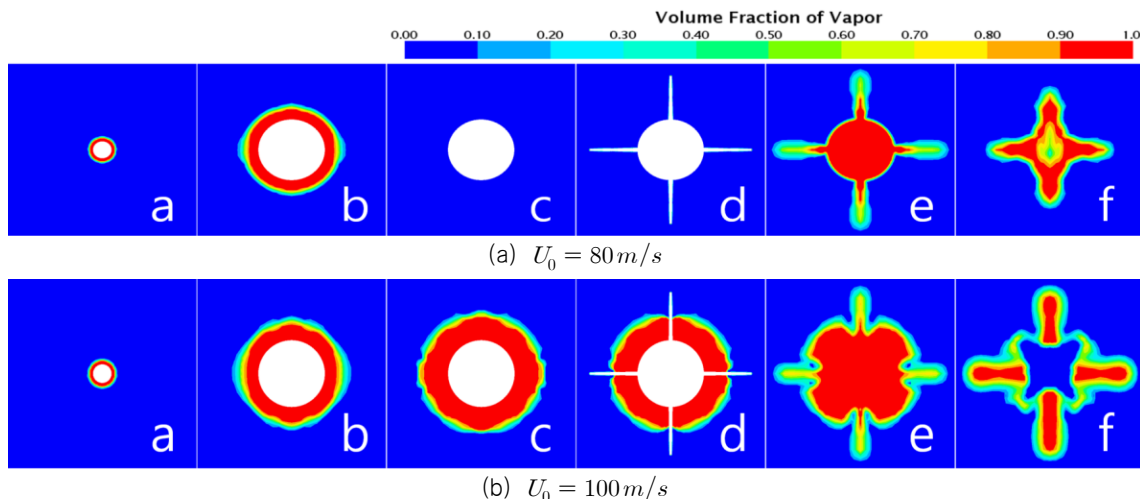


Fig. 9 Cross-section shapes of two cavities around the body at selected constant x-planes

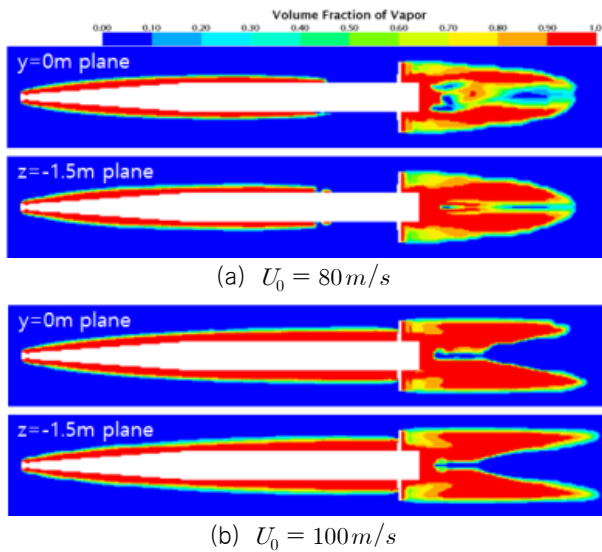


Fig. 10 Longitude-section shapes of two cavities at vertical and horizontal center-planes of the body

Fig. 9에 보인 바와 같이, 두 속도 모두 a 위치에서는 공동의 단면이 원형에 가깝지만, b 위치에서는 속도에 따른 공동 직경 혹은 공동단면 두께의 차이가 난다. 또 후자의 경우에 상하, 좌우방향의 공동단면 형상이 서로 다른데, 이러한 차이는 주로 격자분포와 대칭경계조건의 영향 때문으로 생각된다.

한편, c~f에서는 속도에 따른 공동발달 정도의 차이 때문에 공동단면의 형상이 서로 확연하게 다르다.

속도가 80m/s 인 경우에는, 캐비테이터에서 발생한 공동이 c 위치 이전의 몸통에서 마감되어 c와 d에 나타나지 않는다. 하지만, e와 f에서는 제어핀과 몸통 끝단(base)에서 각각 발생한 공동의

단면을 볼 수 있다.

속도 100m/s 인 경우에는, a~e로부터 캐비테이터의 공동이 몸통을 모두 감싸고 있음을 보여준다. d와 e에서는 제어핀 부근의 압력이 증기압보다 높아서 제어핀 주변의 공동 경계면이 움푹 파인 모양(Fig. 13 참조)으로 나타나며, 이러한 공동 형상의 특징이 몸체 후류까지 남아있는 것을 f의 공동 단면을 통해서 확인할 수 있다. 또 캐비테이터에서 발생한 공동이 제어핀 하단은 물론 몸통 끝단까지 감싸고 제어핀과 몸통 끝단에서 발생한 공동과 합쳐지면서 복잡한 구조의 형상으로 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 80m/s 와 100m/s 일 때, y 평면(상)과 z 평면(하)에서 종축 방향의 공동 단면을 나타낸 것이다.

앞서 살펴본 바와 같이 속도가 80m/s 일 때는 공동이 제어핀 이전의 몸통 상에서 마감되지만, 100m/s 일 때는 몸통을 모두 감싸고 후류(wake)에서 마감된다. 몸통 끝단(base)에서 발생한 공동은 제어핀에서 발생한 공동에 비해서 짧게 발달하며, Fig. 9의 e와 f에 나타낸 공동단면의 형상에서도 이를 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 본 연구에서 계산된 공동 형상을 수중주행실험에서 촬영한 공동사진의 영상과 비교하였다. 좌측은 정상유동 상태에서 계산한 공동 형상이고, 우측은 촬영된 공동 영상이다.

속도 60m/s 인 첫 번째와 90m/s 인 다섯 번째 열을 제외하면 비교된 속도가 일치하지 않고 사진의 공동 영상이 뚜렷하지 못해서 정량적인 비교가 어렵지만, 공동의 발달 정도를 정성적으로 비교할 수는 있다. 속도 60m/s 일 때 계산된 공동 형상(좌)과 촬영된 사진(우)을 비교하면 양쪽 모두 캐비테이터, 몸통 어깨, 제어핀에서 제각기 공동이 발생한 것을 볼 수 있다.

70m/s 일 때 계산결과와 캐비테이터에서 발생한 공동이 어깨

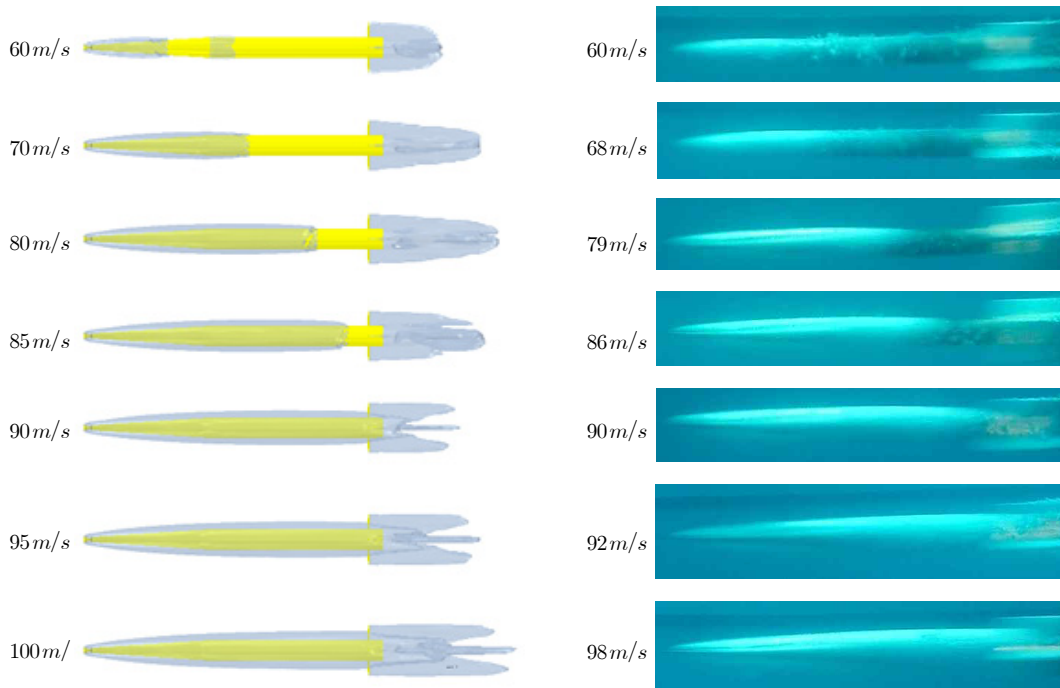


Fig. 11 Comparison of cavity shapes: steady cavity flow calculation(left); underwater test photography(right)

는 물론, 직경이 일정한 원통형 몸통의 20% 이상을 감싸고 있는데 반해서, $68m/s$ 로 조금 낮은 속도에서 촬영된 공동은 어깨를 넘어서 원통형 몸통의 약 10% 남짓 감싼 정도로 발달한 것으로 보인다.

$80 \sim 100m/s$ 는 실험에서 촬영된 공동에 비해 계산된 공동이 약간 더 많이 발달한 것 말고는 비교적 잘 일치하고 있다. 특히, $90m/s$ 이상의 속도에서 캐비테이터 공동이 몸통 끝단을 감싸서 덮을 만큼 발달한 것과, 이미 발달해 있던 몸통 끝단의 공동 및 제어핀의 공동과 합쳐져 형성된 복잡한 3차원 공동 형상이 계산결과(좌)와 실험사진(우)에서 유사하게 나타난 것은 고무적이다.

수중주행실험에서 물체는 정지 상태에서부터 $100m/s$ 에 도달하기까지 추진로켓에 의해 가속된다. 수중에 고정된 카메라로 촬영한 공동의 사진은 가속 상태로 주행하는 물체에 발생한 공동의 순간 영상으로서, 수치해석을 통하여 계산된 정속으로 주행하는 수중물체에서 발생하는 정상 상태의 공동과 본질적으로 다르다고 할 수 있다. 하지만 Fig. 11에 비교하여 나타난 정상 상태의 공동 형상은 수중주행실험에서 가속 주행하는 로켓추진 물체에 발생한 공동의 순간 영상과 놀라울 정도로 잘 일치하고 있다. 이로부터 중력가속도의 5~6배 수준으로 가속 전진 운동하고 있는 수중물체의 초월공동 발달에 가속도가 미치는 영향이 매우 작다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

3.5 속도에 대한 항력 특성

캐비테이터에서 발생한 공동을 식별하기 어려운 저속($20m/s$)으로부터, 초월공동으로 발달하여 몸통과 제어핀을 모두 감싸고 물체후류에서 마감되는 고속($120m/s$)까지, 주행 속도에 따른 물체의 항력 특성을 Table 2에 정리하였다.

Table. 2 Cavitation numbers, drag and drag coefficients according to velocity variations

$U_0 [m/s]$	σ	Drag[N]	C_d
20	0.566	1686	4.303
30	0.251	3126	3.546
40	0.141	5300	3.382
50	0.090	6946	2.837
60	0.063	8216	2.330
70	0.046	8707	1.814
80	0.035	9636	1.537
85	0.031	10147	1.434
90	0.028	9235	1.164
95	0.025	9546	1.080
100	0.023	10010	1.022
110	0.019	11283	0.952
120	0.016	13213	0.937

우선 주목할 점은 통상적인 경우와 달리 항력이 속도의 제곱에 비례하지 않으며, 상대적으로 많이 작은 것이다. 특히, 주행 속도 $85m/s$ 와 $100m/s$ 인 경우를 서로 비교하면 속도 차이가 15%남에도 불구하고 항력의 차이는 약 1% 남짓에 불과하다.

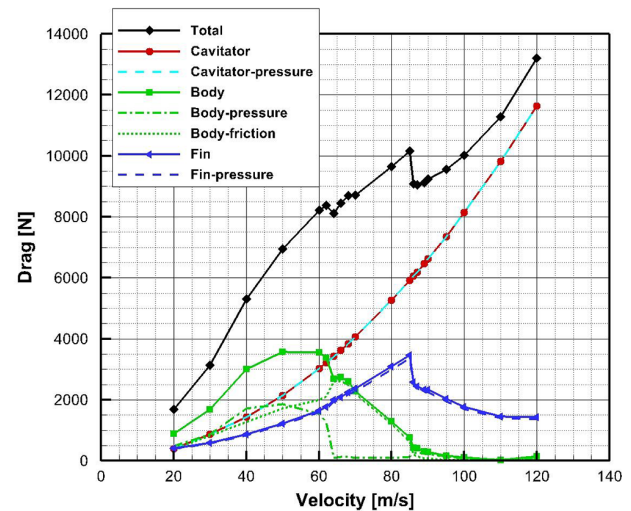


Fig. 12 Variation of the drag with the velocity of the underwater body

Fig. 12는 전체 항력과 각 부분별 항력 그리고 압력 및 마찰항력 성분의 속도에 대한 변화를 나타낸 것이다. 속도 $20m/s$ 일 때 약 1,700 N 부터 $120 m/s$ 일 때 약 13,200 N 까지 속도가 높아짐에 따라서 항력이 대체로 증가한다. 하지만 물체의 부분별 항력이 속도에 따라서 크게 달라지기 때문에 전체 항력도 속도에 따라서 크게 변한다. 특히, $62 \sim 64m/s$ 와 $85 \sim 86m/s$ 구간에서는 속도가 증가하는데 항력이 오히려 감소하는 항력의 역전 현상이 발생한다.

캐비테이터의 항력은 거의 압력항력 성분으로서 속도의 제곱에 비례하는 일반적인 특성을 잘 보여주고 있다. 이에 반해, 몸통의 항력은 $50m/s$ 까지 속도에 비례하여 증가하고, $50 \sim 60m/s$ 구간에서는 거의 일정하며, $60m/s$ 이후에는 오히려 감소한다. $50 \sim 60m/s$ 에서 몸통 항력이 일정한 것은 속도가 높을수록 캐비테이터 공동이 몸통의 전방경사면을 더 많이 감싸면서 나타난 변화이다. 주목할 것은 침수표면적이 줄지만 몸통의 마찰항력은 여전히 늘어나고 압력항력이 줄어드는 점이다.

$60m/s$ 이후, 속도가 높아져도 몸통 항력이 오히려 감소하는 것은, 공동이 어깨를 넘어 평행부를 감싸면서 몸통의 압력항력이 급격히 감소하여 사라지고, $66m/s$ 이후부터 마찰항력이 줄어들기 때문이다. 또 $62 \sim 64m/s$ 속도 구간에서 전체 항력의 역전 현상이 나타난 주된 원인은, 몸통의 압력항력이 급격히 감소하여 속도 $64m/s$ 부근에서 완전히 사라진 것 때문이다.

한편, $85 \sim 87m/s$ 에서 몸통 끝단과 제어핀의 공동이 캐비테이터의 공동과 합쳐져 줄어들면서(Fig. 13), 몸통의 압력항력이 잠시 증가한다. 속도 $86m/s$ 이후에는 공동이 몸통을 대부분 감싸면서(Fig. 13) 몸통의 마찰항력이 거의 사라진다. 그 결과, 몸통 항력이 천천히 감소하여, 속도가 $100m/s$ 에 도달한 이후에는 거의

사라진다. 이와 같이 속도에 대한 몸통 항력의 증감은 캐비테이터에서 발생한 공동이 몸통을 어느 정도 감싸는지에 의해서 결정된다.

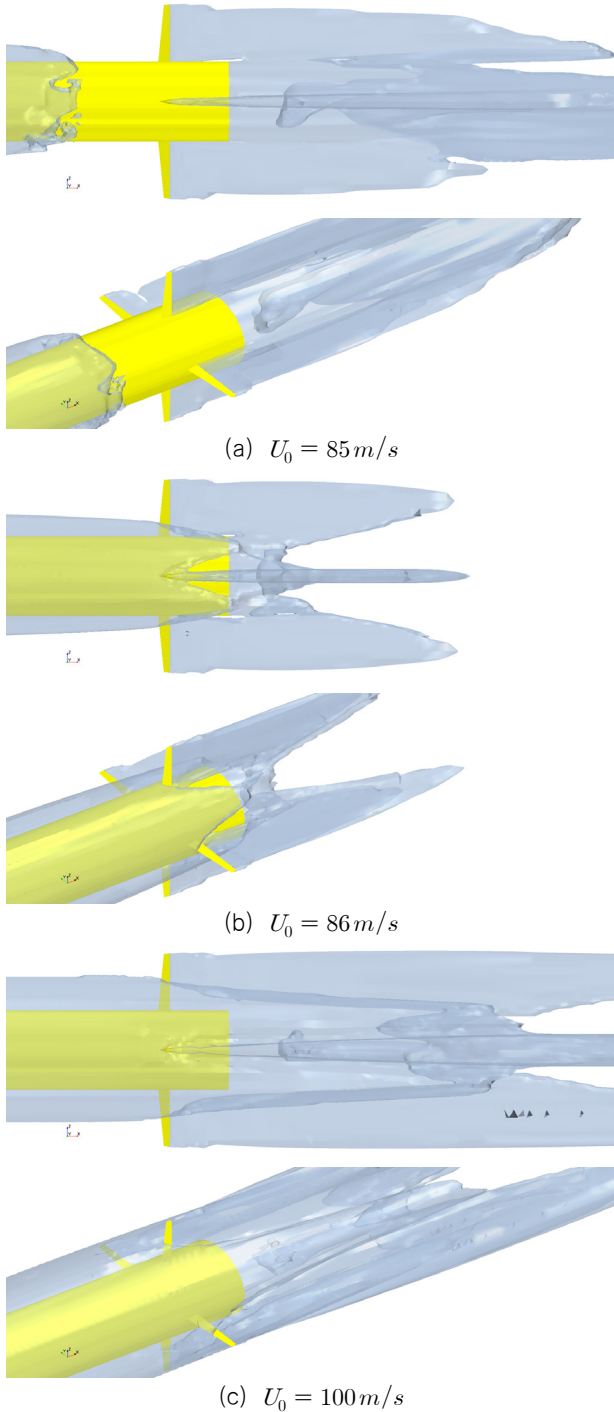


Fig. 13 Formation of CFD cavities around the control fins

제어핀의 항력도 대부분 압력항력으로서 $85m/s$ 까지는 대략 속도 제곱에 비례해서 증가하여 전체 항력의 약 35%까지 커지다가, 속도 $86m/s$ 부근에서 캐비테이터 공동이 제어핀의 하단을 감싸면서(Fig. 13 참조) 급격히 감소한다. 이러한 제어핀 항력의 급격한 감소로 인하여 $85 \sim 86m/s$ 속도 구간에서 전체 항력의 역전 현상이 발생한다. 속도가 $86m/s$ 보다 높아지면서 공동이 커

지고 제어핀을 더 많이 감싸면서, 물에 잠긴 제어핀 상부(액침부분)에 작용하는 항력이 속도 제곱에 비례하여 증가함에도 불구하고, 제어핀의 항력은 점차 감소하다가 일정해진다. 속도에 대한 제어핀 항력의 이상과 같은 변화 때문에 $85 \sim 100m/s$ 속도구간에서 전체 항력이 역전되어 속도 $100m/s$ 의 항력이 $85m/s$ 의 항력보다 오히려 더 작게 나타난다.

한편, $100m/s$ 이상의 속도에서는 몸통에 작용하는 항력은 사라지고, 제어핀의 항력은 감소하여 일정해지며, 캐비테이터의 항력이 전체 항력의 변화를 지배한다. 이에 따라서 전체 항력이 속도 제곱에 비례하여 증가하는 일반적인 특성이 드러난다.

항력 피크가 나타난 속도 $85m/s$ 와 몸통 항력이 거의 사라진 설계 속도 $100m/s$ 의 항력을 보다 더 자세히 분석하기 위해서 Table 3에 주요 구성부의 항력 성분을 구분하여 나타내었다.

Table. 3 Friction and pressure drags of body parts (unit: [N])

	$U_0 = 85 m/s$		$U_0 = 100 m/s$	
	friction	pressure	friction	pressure
Cavitator	1.3	5919.0	1.7	8137.7
Body	621.5	134.1	29.7	78.7
Fin	113.4	3357.9	70.0	1692.1
Total	10147		10010	

두 속도에서 전체 항력의 크기는 거의 다르지 않지만, 각 구성부의 항력 성분을 비교해보면 분명한 차이가 나타난다.

속도 $100m/s$ 일 때 제어핀의 항력(또는 압력항력)이 $85m/s$ 인 경우의 절반으로 줄었고, 몸통 항력은 전체 항력의 약 1%로서 거의 사라졌다. 속도가 $85m/s$ 에서 $100m/s$ 로 높아지면 당연히 캐비테이터의 항력은 속도의 제곱에 비례하여 증가하지만, 캐비테이터에서 발생한 공동이 몸통 전부와 제어핀의 절반가량을 감싸면서 몸통의 항력은 사라지고 제어핀의 항력이 대략 절반으로 크게 감소하였기 때문에 속도 $100m/s$ 의 전체 항력이 속도 $85m/s$ 보다 미소한 차이지만 더 작게 나타난 것임을 알 수 있다.

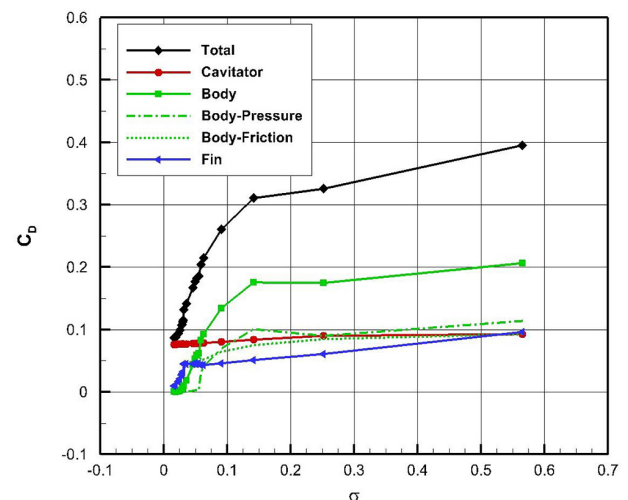


Fig. 14 Variation of the drag coefficient with the velocity of the underwater body

Fig. 14는 전체 항력계수와 각 부분별 항력계수 그리고 몸통의 압력 및 마찰 항력계수의 공동수에 대한 변화를 나타낸 것이다. 여기서 항력계수는 $C_D = Drag / (0.5\rho_l U_0^2 (\pi D^2/4))$ 로서 몸통 평행부의 단면적으로 무차원화 하여 정의하였다.

한편, 본 연구의 해석 결과에 의하면 대부분의 속도 구간에서 전체 항력 중 제어핀의 항력이 차지하는 비중이 상당히 큰 것으로 파악되므로 이에 대한 검토가 필요하다. 구조적 안전상의 문제가 없는 범위 내에서 제어핀의 두께를 줄이고 항력을 감소시킨다면 속도 성능을 개선할 여지가 있으며, 제어핀으로 인해 나타난 항력 피크와 역전 현상도 완화될 것으로 사료된다.

4. 결 론

국내에서 수행하고 있는 수중주행실험 물체를 대상으로, 실험 수심 및 속도 조건에서 정상 상태의 공동유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 수중물체에 발생하는 공동 형상과 물체의 각 부분에 작용하는 항력을 조사, 분석하였으며, 본 연구를 통해 도출한 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 저속(초기가속) 구간에서는 캐비테이터, 몸통의 어깨 및 끝단 그리고 제어핀에서 발생한 공동이 제각기 발달한다. 속도가 더 빨라지면 캐비테이터에서 발생한 공동이 더 크게 발달하면서 다른 공동들과 순차적으로 합쳐지고, 몸통을 모두 감싸서 하나의 초월공동을 형성한다.

둘째, 수중주행실험에서 촬영한 공동 사진은 가속 주행하는 물체에 발생한 공동의 순간 영상으로서, 정속 주행하는 물체에서 발생하는 정상 상태의 공동과 본질적으로 다를 수 있음에도 불구하고, 본 연구에서 계산한 정상 공동 형상은 가속 주행하는 수중물체에 발생한 공동의 순간 영상과 놀라울 만큼 잘 일치한다. 이로부터 중력가속도의 5~6배 수준으로 직진 가속 운동하고 있는 수중물체에서 발생하는 공동에 가속도가 미치는 영향은 매우 작다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

셋째, 수중물체의 항력이 속도 제곱에 비례하는 통상의 경우와 달리, 초월공동 수중물체의 항력은 속도 제곱에 비례하지 않으며, 이보다 작게 나타난다. 이는 속도가 빠를수록 캐비테이터에서 발생하는 공동이 커지고 몸통을 더 많이 감싸서 물과 직접 접촉하는 물체의 침수표면적이 줄어들어서 결국에는 사라지기 때문이다. 이와 같이 속도에 대한 항력의 증감은 캐비테이터에서 발생한 공동이 수중물체를 어느 정도 감싸는지에 의해서 결정된다. 한편, 몸통과 제어핀에서 따로 발생하는 공동은 저항감소 효과 면에서 유용하지 않으므로, 이를 억제하는 방향으로 몸통과 제어핀의 형상을 설계할 필요가 있다.

넷째, 수중물체 각 부분의 항력이 속도에 따라 크게 달라지기 때문에 전체 항력도 속도에 따라서 크게 변한다. 특히, 85 ~ 86 m/s 구간에서는 속도가 증가하는데 항력은 오히려 급격히 감소하는 현상이 나타난다. 이러한 전체 항력의 역전 현상은 86m/s 부근에서 캐비테이터가 발생시킨 공동이 제어핀의 하단을 감싸면서 제어핀의 항력이 급격하게 감소하여 발생한 것이다. 또 62 ~ 64

m/s에서 나타난 항력 역전의 주된 원인은 몸통의 압력항력이 급격히 감소하여 속도 64m/s 부근에서 사라진 것 때문이다

다섯째, 제어핀 항력은 85m/s에서 전체 항력의 약 35%까지 커지며, 공동이 충분히 발달하여 몸통을 모두 감싼 이후에도 전체 항력 중 제어핀 항력이 차지하는 비중이 상당히 큰 것으로 사료되므로 이에 대한 세심한 검토가 필요하다.

향후, 가속 직진하는 수중물체의 비정상 공동 유동을 수치해석하고, 정지 상태에서 설계 속도에 이르기까지 운동방정식을 수치적으로 모사하여 수중물체의 운동을 재현하며, 재현된 결과를 수중주행실험의 계측 결과와 비교, 검증할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원 민군기술협력 사업 (초공동 수중운동체의 초공동 형상 및 유체력 특성 해석, 2014-2338-01)의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- 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, pp.123-131.
- Ahn, B.K., Jeong, S.W., Kim, J.H., Shao, S., Hong, J. & Arndt, R. E.A., 2017. An experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitator. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9, pp.227-237.
- Choi, J.K., Ahn, B.K. & Kim, H.T., 2015. A numerical and experimental study on the drag of a cavitating underwater vehicle in cavitation tunnel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(5), pp.888-905.
- Karn, A., Arndt, R.E.A. & Hong, J., 2016. An experimental investigation into supercavity mechanisms. *Journal of Fluid Mechanics*, 789, pp.259-284.
- Kim, Y.G. & Nah, Y.I., 2011. Propulsion technologies of supercavitating rocket torpedo, Schval. *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Busan, Korea, 24-25 November, pp.383-387.
- Kim, H.T. & Lee, H.B., 2014. A numerical analysis of gravity and free surface effects on a two-diemnsional supercavitating flow. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 51(5), pp.435-449.
- Kim, B.J., Choi, J.K. & Kim, H.T., 2015. An experimental study on ventilated supercavitation of the disk cavitator. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 52(3), pp.236-247.

- Kim, H.T., Kang, K.T., Choi, J.K., Jung, Y.R. & Kim, M.J., 2018. A numerical study of effects of body shape on cavity and drag of underwater vehicle. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 55(3), pp.252-264.
- Kinzel, M.P., Lindau, J.W. & Kunz, R.F., 2009. Air entrainment mechanisms from artificial supercavities: insight based on numerical solutions. *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation(cav 2009)*, Paper No. 136.
- Saranjam, B., 2013. Experimental and numerical investigation of an unsteady supercavitating moving body. *Journal of Ocean Engineering*, 59, pp.9-14.
- Rabiee, A., Alishahi, M. M., Emdad, H. & Saranjam, B., 2011. part A: Experimental investigation of unsteady supercavitating flows. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 35(M1), pp.15-29; part B: Numerical investigation of unsteady supercavitating flows. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 35(M1), pp.31-46.
- Riabouchinsky, D., 1919. On steady fluid motion with free surface. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 19, pp.206-215.
- Ruggaber, W. & Hinding, W., 2006. Barracuda – guidance & control of a super cavitating high speed underwater missile. *Proceedings of UDT Europe 2006*.
- Semenenko, V.N., 2001. Artificial supercavitation. physics and calculation. *RTO AVT lecture series on "Supercavitating Flows"*, VKI in Brussels, Belgium.
- Skidmore, G.M., Lindau, J.W., Brungart, T.A., Moeny, M.J. & Kimzel, M.P., 2017. Finite volume, computational fluid dynamics-based investigation of supercavity pulsations. *Journal of Fluid Engineering*, 139, pp.091301-1~10.
- Spurk, J.H., 2002. On the gas loss from ventilated supercavities. *Acta Mechanica*, 155(3), pp.125-135.
- STAR-CCM+ 9.02 User's Guide, 2014.
- Vlasenko, Y. D., 2003. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds. *Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation(cav 2003)*, Osaka, Japan, Cav03-GS-6-006.
- Wosnik, M. & Milosevic, I., 2005. Time-resolved particle image velocimetry (TR-PIV) in ventilated and naturally cavitating flows. *Proceedings 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Pasadena, CA, USA.



김 형태



최 은 지



강 경 태



윤 현 걸