

받음각을 갖는 초공동 수중 운동체에서 발생하는 초월공동과 유체력 특성에 대한 수치적 연구

전윤호[†]·박정훈·전관수
엘아이지넥스원

A Numerical Study on the Characteristics of the Supercavitation and Hydrodynamic Forces Generated in a Supercavitating Underwater Vehicle with Angle of Attack

Yunho Jeon[†]·Jeonghoon Park·Kwansoo Jeon
LIG Nex1

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.

Recently, as the technology of the supercavitating underwater vehicle is improved, the necessity of research for maneuvering characteristics of the supercavitating underwater vehicle has emerged. In this study, as a preliminary step to analyzing the maneuverability of a supercavitating underwater vehicle, the characteristics of cavity shapes and hydrodynamic forces generated in a supercavitating underwater vehicle with an angle of attack were evaluated numerically. First, the geometry was designed by modifying the shape of the existing supercavitating underwater vehicle. The continuity and the Navier-Stokes equations are numerically solved, and turbulent eddy viscosity is solved by the $k-\omega$ SST model. The results present the characteristics of cavity shape and the hydrodynamic forces of the designed geometry with an angle of attack.

Keywords : Cavitation(공동 현상), Supercavitating underwater vehicle(초공동 수중운동체), Angle of attack(받음각), Characteristics of the supercavitation(초공동 형상특성), The hydrodynamic forces of supercavitating underwater vehicle(초공동 수중운동체의 유체력)

1. 서론

수중에서 고속으로 이동하는 물체 주위의 국부압력이 유체의 증기압(vapor pressure)보다 낮아지면 유체는 기화되어 공동이 발생한다. 일반적으로 공동현상은 선박의 추진기나 선체표면을 부식시키고, 추진 효율감소를 유발하여 공동을 최소화하기 위한 연구들이 진행되었다. 하지만, 공동이 생성된 상태에서 수중운동체의 주행 속도가 더욱 증가하면, 공동이 운동체 전체를 덮을 만큼 성장하게 되는데 이를 초월공동(super-cavitation)이라 한다. 초월공동으로 둘러싸인 수중운동체는 전면부의 접수면을 제외한 대부분의 표면이 공동에 둘러싸여있기 때문에, 마치 공기중에서 이동하는 것과 같은 효과를 얻는다. 따라서, 물체 표면에 작용하는 마찰저항이 급격히 감소하여 수중에서도 고속으로 주행할 수

있다. 초월공동 기술을 어뢰에 적용하여 군사적으로 개발한 대표적인 예로 러시아에서 개발한 Shkval이 있다. Shkval은 일반적인 중어뢰와 유사한 크기의 형상을 가지고 있다. 하지만, Shkval은 200 knots 이상으로 일반 중어뢰의 주행속도 약 50 knots보다 4~5배 빠른 것으로 알려져 있다. 따라서, 초월공동을 이용한 수중운동체는 미국, 독일, 이란, 중국과 같은 군사 기술 경쟁 국가들 사이에서 해상 전술을 다양화 시킬 수 있는 미래 무기기술로 인식되고 있으며, 최근에는 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 최근들어, 초공동 수중운동체의 기초연구가 활발하게 이루어짐에 따라, 초공동 수중운동체의 주행특성에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다.

초월공동을 발생시키는 방법은 두가지가 있다. 첫 번째, 자연공동(natural super-cavitation)은 운동체의 속도가 증가하여, 운동체 주변의 유체 압력이 감소하면서 자연적으로 초

월공동이 발생하는 방법이다. 두 번째, 환기공동(ventilated super-cavitation)은 운동체 주위에 가스를 분사시켜 인공적으로 초월공동을 발생시키는 방법이다.

초월공동 기술연구는 Riabouchinsky (1919)의 연구를 시작으로 하여 Reichardt (1940)에 의해 정립되었다. 이후 Self and Ripken (1955)은 자유낙하 수류시험 터널(free-jet water tunnel)을 통해 원판, 원뿔과 같은 축대칭 물체에 발생하는 초월공동의 형상특성을 관측하였고, Waid (1957)은 캐비테이션 터널 실험을 통해 뿔, 평판과 같은 2차원 물체에 발생하는 공동의 형상특성을 계측하였다. 캐비테이션 터널실험연구는 오늘날에도 유사하게 모사되어 초공동 수중운동체의 초기연구 단계에 활용되고 있다. 또한 Tulin (1953), Garabedian (1956), Wu (1956)에 의해 초월공동에 대한 포텐셜 유동해석을 통한 수치적, 이론적 연구가 수행되었다. 최근에는 초공동 수중운동체의 제어알고리즘에 대한 연구 (Gary, 2006), 전산유체역학(CFD)을 활용하여 캐비테이터와 물체를 포함한 수중운동체에서 발생하는 공동의 형상 및 유체력 특성에 대한 연구 (Xulong & Tao 2016)가 이루어졌으며, 분사가스 및 추진연소가스가 공동의 형상에 미치는 영향에 대한 연구 (Kinzel et al., 2017) 등이 이루어지며 초공동 수중운동체에 대한 응용연구가 활발히 이루어지고 있다.

국내에서는 2000년대 들면서 초월공동과 관련된 실험 및 이론해석 연구 (Ahn et al., 2010; Kim et al., 2016; Jeong et al., 2018)가 활발히 수행되어 왔다. 최근 수중운동체의 머리 부분에 위치한 캐비테이터(cavitor), 몸체(body) 그리고 제어핀(control fin)을 포함한 형상을 대상으로 한 전산유체역학(CFD)을 활용한 연구가 수행되어 왔다 (Park et al., 2018; Kim et al., 2019).

초공동 수중운동체를 구성하는 주요 요소 중 하나인 캐비테이터는 운동체 전면에 위치하여 공동을 생성시키고 이를 초월공동으로 성장시키는 역할을 한다. 초월공동이 생성되면, 수중운동체의 몸체는 기체로 뒤덮여있기 때문에 몸체는 부력을 받을 수 없고, 캐비테이터와 공동 밖으로 일부 노출된 제어핀은 초공동 수중운동체의 제어력을 확보하는 주요한 역할을 수행한다.

또한, 대부분의 수중운동체는 직진 주행시 받음각을 가진채로 주행한다. 따라서, 초공동 수중운동체의 직진주행성능 및 조종성능을 분석하기 위해서는 캐비테이터의 받음각과 몸체 받음각에 따른 공동의 형상특성과 유체력 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 초공동 수중운동체의 초기설계 단계에서 조종 및 제어특성을 확보하기 위한 선행단계로 캐비테이터의 받음각, 초공동 수중운동체의 받음각에 따른 공동의 형상과 유체력특성을 수치해석적으로 분석하였다. 상용 CFD S/W인 Fluent 19.2를 이용하여 다상유동해석을 수행하였다. 이를 통해, 캐비테이터와 초공동 수중운동체의 받음각이 공동의 형상특성과 항력특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

유동장의 지배방정식은 연속방정식이며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 3차원 초공동의 수치해석을 위해 비압축성, 정상유동으로 가정하였다. 상은 물(water)과 증기(water-vapor)로 총 2개의 상으로 이루어져 있다.

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

여기서 \vec{v} 은 혼합유체의 속도이며, 각각의 상이 동일한 속도를 갖는 균일속도(mass averaged mean velocity)이다. ρ_m 은 혼합 밀도(mixture density)이며, 2상에 대한 질량평균 혼합밀도는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2, \quad \sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1 \tag{2}$$

여기서 k는 혼합유체 내에 존재하는 유체의 상이며, α_k 는 k상의 체적분율(volume fraction)이다.

Navier-Stokes 방정식은 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \mu_m \nabla^2 \vec{v} + \rho_m g_j \tag{3}$$

여기서 μ_m 은 혼상 점성계수를 나타내며, μ_m 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \mu_k, \quad \mu_k = \mu + \mu_t \tag{4}$$

여기에서 μ_t 는 난류점성계수(turbulence viscosity)이다. μ_t 는 k- ω SST 난류모델을 사용하여 계산하였다. 물체 벽면 경계조건 처리는 표준 벽함수(standard wall function)를 사용하였다.

2.2 캐비테이션 모델

본 연구에서는 1차상(primary phase)을 물, 2차상(secondary phase)을 증기로 설정하였다. 물과 증기로 이루어진 다상유동(multiphase flow) 해석을 위하여 상의 경계면(phase interface)을 추적하는 방법인 Volume of fluid 방법을 적용하였다. 상과 상 사이의 경계는 식 (5)과 같이 증기에 대한 체적분율을 2차상에 대한 체적분율 방정식(volume fraction equation)을 통해 구하고, 식 (2)를 통해 1차상인 물의 체적분율을 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}) = -\nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_v) + \sum_{q=1}^2 (\dot{m}^- - \dot{m}^+) \tag{5}$$

여기서 m^- 는 상변화에 의해 액상이 기화하는 질량변화량을 의미하며, 반대로 m^+ 는 상변화에 의해 기상이 응축되는 질량변화량을 의미한다.

캐비테이션의 유동해석을 위해서는 체적분율 수송방정식을 풀어야 한다. 캐비테이션 수송방정식은 시스템내의 상변화에 의한 열역학 및 동역학적 항으로 구성되며, 본 연구에서는 Schnerr and Sauer (2001)의 캐비테이션 모델을 사용하였다. Schnerr and Sauer의 캐비테이션 모델은 식 (8)에서 확인할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}) \quad (8)$$

$$= \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_v - p)}{\rho_l}}$$

여기서 R은 증기 기포의 반지름이며 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\eta_0} \right)^{1/3} \quad (9)$$

이 때 η_0 는 증기의 핵밀도이며, 본 연구에서는 1×10^{13} 으로 설정하였다.

2.3 수치해석 모델

초공동 수중운동체의 수치해석은 상용수치해석 프로그램인 Fluent 19.2에서 수행하였다.

수중운동체 전체형상은 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에 활용된 초공동 수중운동체의 형상은 캐비테이터, 목(neck), 몸체, 제어핀으로 구성된다. 캐비테이터의 직경을 D_c , 전체 길이를 L_A , 몸체의 직경을 D_B , 제어핀 폭을 F_S 으로 정의하였다. 제어핀의 단면은 삼각형 형상이며, 몸체에 가까이 갈수록 두께와 길이가 길어지는 Swept-wing 으로 선정하였다.

Fig. 2는 초공동 수중운동체의 유동해석을 위한 유동영역과 좌표계를 나타낸다. 캐비테이터 중심을 좌표 원점으로 잡고, 유동방향을 x축, 상방향을 z축, 운동체의 우현을 y축으로 정하였다.

유동역역 생성 시 벽효과(wall effect)와 후류효과를 방지하기 위해 격자영역을 충분히 넓게 확보하였다. 수중운동체 전체길이 L_A 를 기준으로 하여 유입경계는 캐비테이터 앞면으로부터 $1L_A$, 유출경계는 몸체 끝에서부터 $3L_A$ 으로 설정하였다. 그 외 y축, z축의 최외각면의 거리는 제어핀 폭 F_S 를 기준으로 하여 $8F_S$ 로 설정하였다.

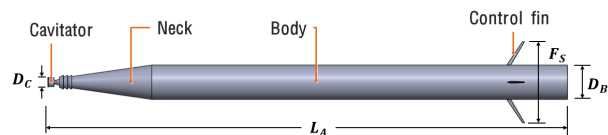


Fig. 1 External shape of an supercavity underwater vehicle

Fig. 3은 수치해석을 위한 격자를 보여준다. 수중운동체 주위의 격자수를 다수분포시키기 위하여 27개의 유동영역으로 나누어 격자를 분포하였다. 수중운동체를 포함한 격자영역은 non-structural 격자를 분포하였으며, 격자수를 감소시킴과 동시에 정확성을 동시에 확보할 수 있도록 다면체 격자(polyhedra mesh)를 적용하였다. 또한, 그 외 나머지 영역은 structural 격자를 분포하였다. y+의 평균은 100 ~ 150 이며, 사용된 격자의 개수는 약 350만개이다.

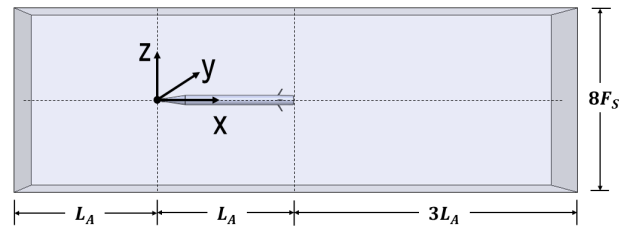


Fig. 2 Definition of coordinates and domain size

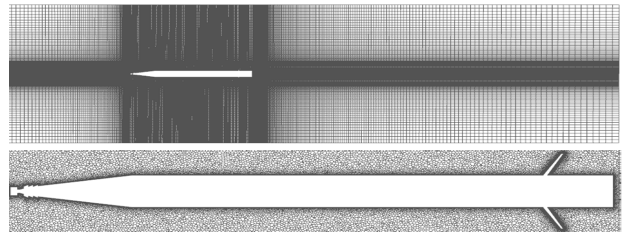


Fig. 3 Polyhedral mesh in analysis domain

Table 1 Physics

Group	Item	Setting
Solver	Type	Pressure-based
	Time	Steady
Models	Viscous	k- ω SST
	Multiphase	Volume of fluid
Phase	Primary	Water-liquid
	Secondary	Water-vapor
	Interaction	Schnerr-Sauer cavitation (2350 Pa)

Table 2 Boundary condition

Group	Item	Setting
Velocity inlet	velocity	100 m/s
Pressure outlet	Gauge pressure	depends on depth and velocity
Turbulence	Specification method	Intensity and viscosity ratio
	Turbulent intensity(%)	5
	Turbulent viscous ratio	10

Table 3 Solution

Group	Item	Setting
Pressure-velocity coupling	Scheme	Coupled algorithm (solves the momentum and continuity equation together)
	Gradient	Least squares cell based
Spatial discretization	Pressure	Body force weighted (computes the face pressure by assuming the normal gradient of the difference between pressure and body forces is constant)
	Momentum	Second order upwind
	Volume fraction	Compressive (Compressive interface capturing scheme)
	Turbulent kinetic energy	Second order upwind
	Specific dissipation rate	Second order upwind

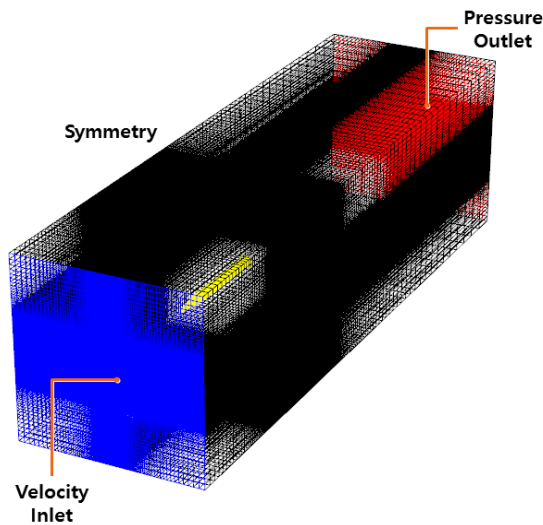


Fig. 4 Boundary Condition

유동영역에 대한 경계조건으로, 유입 경계에는 균일속도 조건을 사용하였다. 유출경계에는 절대압력 조건을 사용하였으며, 나머지 모든 면은 대칭조건을 사용하였다. 수치해석에 활용한 물리 조건, 경계조건, 이산화 방법은 Table 1,2,3에 요약하였다. Fig. 4는 수치해석의 경계조건을 보여준다.

2.4 수치해석 모델 검증

본 연구의 수치해석 모델을 검증하기 위해 원판형(disk type) 캐비테이터의 단독특성 해석결과를 실험 결과를 통해 얻은 경험

식과 비교하였다. 캐비테이터의 단독특성은 초공동 수중운동체의 캐비테이터를 제외한 나머지 구성부는 제외한 상태에서 속도를 0 m/s에서 100 m/s까지 10 m/s씩 올리며 해석을 수행하였다.

원판형 캐비테이터에서 발생한 공동의 길이(L_s)와 직경(D_s) 특성을 Garabedian (1956)의 점근 근사식과 포텐셜 유동의 수치해 및 실험자료를 통해 획득한 Logvinovich (1973), Guzevsky (1983)의 경험식과 비교하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Garabedian (1956), Logvinovich (1973), Guzevsky (1983)의 원판형 캐비테이터에서 발생하는 공동의 길이 및 직경 추정식은 각각 Table 4와 같다.

Table 4 Formulas for estimating supercavity shape pf disk

Particular	Formulas
Garabedian (1956)	$\frac{D_s}{D_c} = \sqrt{\frac{C_D}{\sigma}}$ $\frac{L_s}{L_c} = \sqrt{C_D} \times (\sqrt{\ln \frac{C_D}{\sigma}} \times \frac{1}{\sigma})$
Logvinovich (1973)	$\frac{D_s}{D_c} = \sqrt{\frac{C_D}{k\sigma}} \quad (k = 0.95)$ $\frac{L_s}{L_c} = \sqrt{C_D} \times (2 \times \frac{1}{\sigma})$
Guzevsky (1983)	$\frac{D_s}{D_c} = \sqrt{\frac{C_D}{k\sigma}}$ $(0.9 < k = \frac{1+50\sigma}{1+56.2\sigma} < 0.96)$ $\frac{L_s}{L_c} = \sqrt{C_D} \times (\sqrt{\ln \frac{1}{\sigma}} \times (\frac{1.1}{\sigma}))$

각각의 식에 사용된 항력계수 공식은 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Formulas for estimating supercavity shape pf disk

Particular	Formulas
Garabedian (1956)	$C_D = C_{D_0}(1 + \sigma) \quad (C_{D_0} = 0.827)$
Logvinovich (1973)	$C_D = C_{D_0}(1 + \sigma) \quad (C_{D_0} = 0.82)$
Guzevsky (1983)	$C_D = C_{D_0} + 0.86\sigma \quad (C_{D_0} = 0.838)$

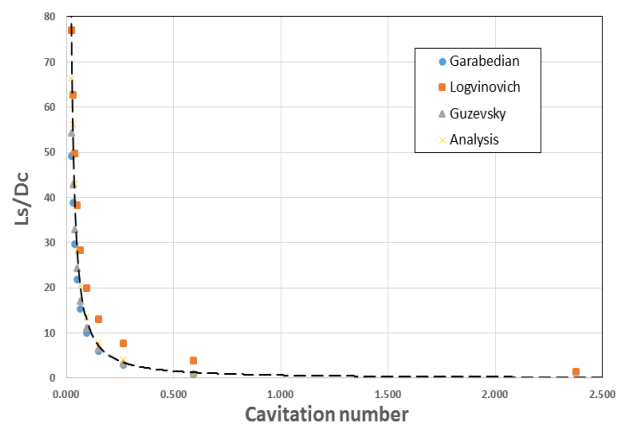


Fig. 5 Comparison of cavity length

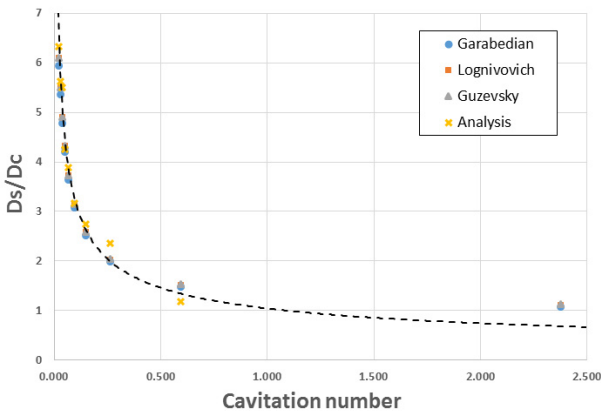


Fig. 6 Comparison of cavity length

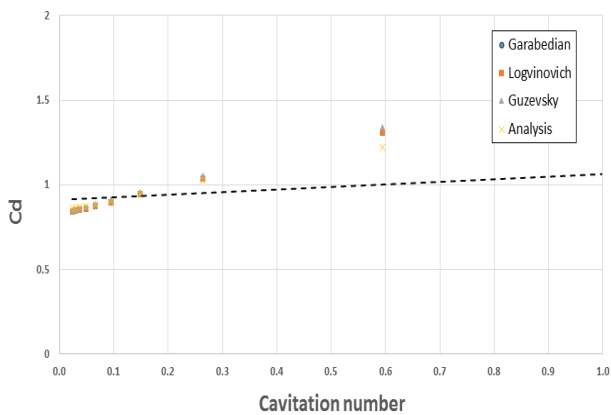


Fig. 7 Comparison of drag coefficient

Table 6 Comparison between simulation and Garabedian formulas

v [m/s]	σ	$\frac{L_s}{L_{S_Garabedian}}$	$\frac{D_s}{D_{S_Garabedian}}$	$\frac{C_D}{C_{D_Garabedian}}$
20	0.6	1.16	0.8	0.93
30	0.26	1.38	1.19	0.99
40	0.15	1.33	1.09	1.00
50	0.1	1.32	1.03	1.01
60	0.07	1.33	1.07	1.01
70	0.05	1.28	1.01	1.02
80	0.04	1.45	1.15	1.02
90	0.03	1.45	1.05	1.02
100	0.02	1.35	1.07	1.02

수치해석 결과 원판형 캐비테이터에 의해 발생하는 공동의 형상 특성은 추정공식과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 항력계수는 캐비테이션 수가 큰 구간에서는 다소 차이가 있지만, 속도가 빨라져 캐비테이션 수가 낮은 구간에서는 해석결과와 실험결과가 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. Table 6는 수치해석을 통해 얻은 공동의 길이(L_s), 직경(D_s), 항력계수(C_D)를 Garabedian의 추정식을 통해 획득한 값과 비교하여 표로 나타낸 결과이다. 길이, 직경, 항력계수에 대한 가장 큰 오차는 각각 8%, 9%,

6.9%로 수치해석 결과와 추정공식 및 실험결과가 매우 잘 일치하는 것을 보여준다.

3. 수치해석 결과

본 연구는 초공동 수중운동체의 조종성능 분석을 위한 초공동 수중운동체의 몸체와 부가물의 거동 영향을 해석적으로 분석하고자 하였다.

수심(h)은 2 m, 초공동 수중운동체의 주행속도는 100 m/s이며, 초공동 수중운동체의 거동 요소로 캐비테이터의 받음각(α), 몸체 받음각 (AOA)을 선정하였으며, 조건에 따른 수치해석 Case는 Table 7에 나타내었다. 캐비테이터의 받음각(α)과 몸체 받음각 (AOA)은 Fig. 8와 같이 정의한다.

Table 7 Condition for calculation

h [m]	2
g [m/s ²]	9.81
V [m/s]	100
σ	0.024
α	-0°, -5°, -10°, -15°, -20°
AOA	0°, 1°, 2°, 3°, 4°, 5°

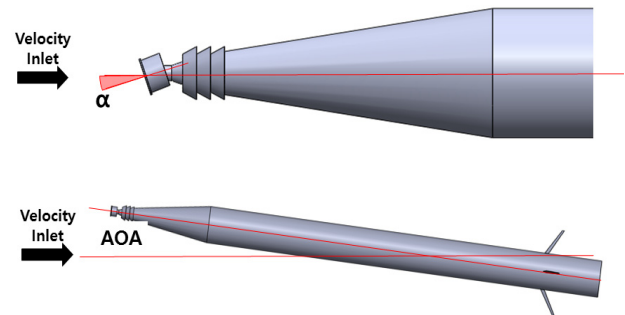


Fig. 8 Definition of α and AOA

3.1 캐비테이터 받음각에 따른 공동 특성

캐비테이터 받음각(α)에 따른 공동의 특성과 초공동 수중운동체에 작용하는 외력특성을 수치해석을 통해 분석하였다. 캐비테이터 받음각은 0°에서 -20°까지 -5°씩 증가하며 해석을 수행하였다. Fig. 9는 캐비테이터 받음각에 따라 발생하는 공동의 형상과 율곡도를 나타낸다. 물과 증기의 체적분율 0.5인 면을 공동의 경계면으로 정의하였다.

캐비테이터 받음각(α)이 0°일 때, 캐비테이터에서 발달한 공동이 몸체 전체를 감싸고 있다. 제어핀의 일부도 공동에 잡혀 물과 접하는 부분(이하 액침)의 길이가 감소한 것을 확인할 수 있다. α 가 0°일 때, 발생한 공동의 형상은 수중운동체 몸체의 중심으로 부터 동일한 반경을 이루고 있으며, 공동 바깥으로 노출된 제어핀

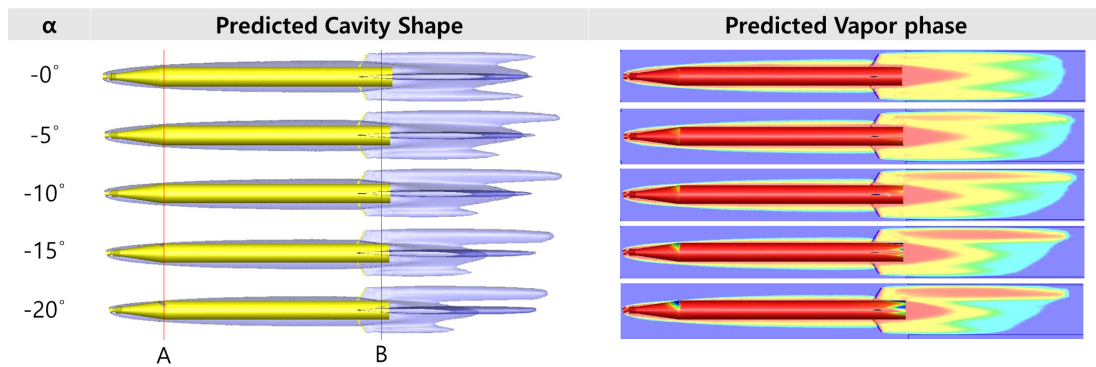


Fig. 9 Predicted Cavity Shape & Vapo phase according to α

액침의 길이는 제어핀 길이의 약 65%인 것을 확인할 수 있다. 공동의 후미로 갈수록 부력의 영향을 받아 +z방향으로 약간 기울어져 진행되는 것을 확인할 수 있다.

α 가 커짐에 따라, 발생하는 공동의 형상이 비대칭적으로 변형된다. +z 방향의 공동 체적은 줄어들고, -z 방향의 공동 체적은 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그 결과, 초공동 수중운동체의 목(Neck)부분이 점점 공동 밖으로 노출되고, 상부 제어핀과 하부 제어핀의 액침길이가 차이가 있음을 볼 수 있다. 또한, 비대칭적인 공동의 형상으로 인하여 공동이 몸체 전체를 덮지 못한 채 마감되는 것을 확인할 수 있다.

α 가 -20° 일 때 상부 제어핀의 액침은 약 75% 노출되어 있으며, 하부 제어핀의 액침은 50%만 노출이 된다. 이 상태에서는, 액침의 길이가 길어진 상부 제어핀의 제어력은 상승하게 되고, 액침의 길이가 짧아진 하부 제어핀의 제어력은 저하될 것으로 보인다.

Fig. 9의 단면 A는 초공동 수중운동체의 어깨부를 나타내고, 단면 B는 길이방향 95%지점을 나타낸다. Fig. 10은 단면 A, B에서 공동의 윤곽도를 보여준다. 0° 에서 원형을 이루고 있던 공동의 형상이 α 가 증가함에 따라 공동의 형상이 점점 비대칭적으로 변형된다. α 가 -20° 일 때, +z 방향의 공동 반경이 줄어들어 수중

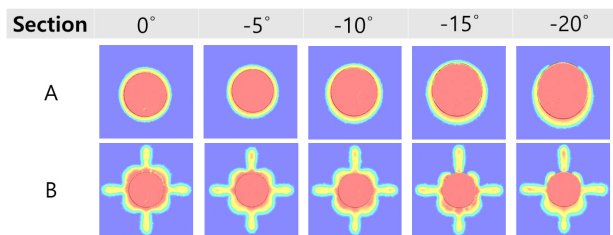


Fig. 10 Vapor phase at Section A and Section B

Table 8 Drag, Lift, and Moment according to α

α	Drag [N]	Lift [N]	Moment [N-m]
0°	9575	0	0
5°	9532	629	1070
10°	9363	1262	2097
15°	9290	1645	3272
20°	9120	1582	4004

운동체의 어깨를 공동으로 감싸지 못하게 되며, 몸체의 끝부분 또한 공동 바깥으로 노출되는 것을 확인할 수 있다.

Table 8은 캐비테이터 받음각(α)의 절대값에 따른 초공동 수중운동체의 항력, 양력 그리고 모멘트를 보여준다. Fig. 11은 α 의 절대값에 따른 항력을 압력항력과 마찰항력 성분으로 나누어 곡선으로 나타내었으며, Fig. 12와 Fig. 13은 각각 α 에 따른 양력과 y축 모멘트를 곡선으로 나타내었다.

α 절대값이 커짐 따라 항력은 감소한다. 이는, α 가 커짐에 따라 공동 바깥으로 노출되는 면적이 늘어나 마찰항력이 증가하지만, 캐비테이터의 압력면적이 감소하여 줄어드는 압력항력 비율이 더 크기 때문이다. 항력이 감소하는 반면, 양력과 모멘트는 증가하는 것을 볼 수 있다. α 가 증가함에 따라 캐비테이터에 력과 모멘트를 발생시킨다. 캐비테이터에 따른 항력, 양력, y축

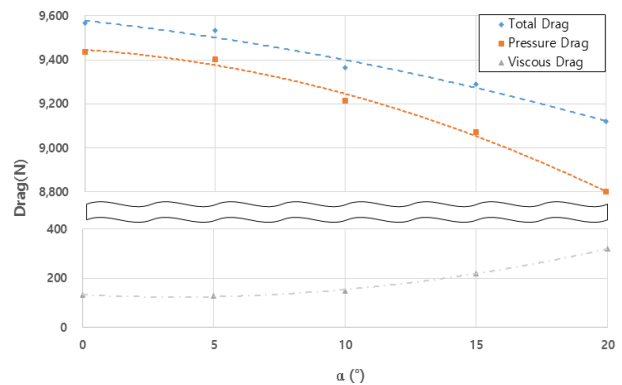


Fig. 11 Drag according to the α of the cavitator

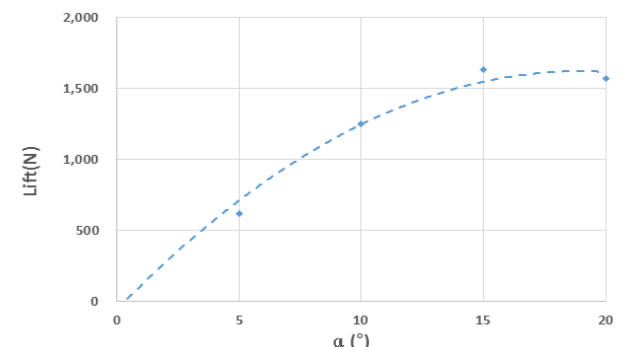


Fig. 12 Lift according to the α of the cavitator

작용하는 항력이 분산되어 +z 방향으로 작용하게 되고, 이는 양 모멘트의 경향성을 통해 유체력 계수를 도출할 수 있고, 추후 제어기 설계에 활용할 수 있다.

Table 9는 캐비테이터 받음각(α)의 절대값이 증가함에 따른 초공동 수중운동체의 전체항력과 각 구성부 별 항력성분을 보여준다. Fig. 14는 α 절대값에 따른 구성부 별 항력을 그래프로 나타내었다.

캐비테이터 받음각(α)이 0°일 때, 캐비테이터에 85% 이상, 제어핀에 14% 이상의 항력이 작용하며, 몸체에는 0.01% 이하의 항력이 작용하는 것을 확인할 수 있다.

α 절대값이 증가함에 따라 초공동 수중운동체에 작용하는 전체 항력은 감소한다. 이는 항력의 대부분을 차지하고 있는 캐비테이터의 유동방향 투영면적이 감소하여, 캐비테이터의 항력이 감소하였기 때문이다. 반면, 몸체에 작용하는 항력은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는, α 가 증가함에 따라 공동의 형상이 비대칭적으로 발달하여, +z 방향의 캐비테이터 반경이 감소함으로 인해, 몸체의 일부가 공동 밖으로 노출되었기 때문이다.

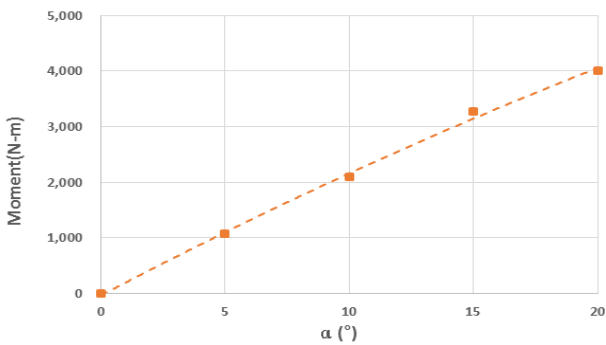


Fig. 13 Moment according to the α of the cavitator

Table 9 Drag according to α

α	Drag [N]				
	Total	Cavitator	Neck	Body	Fin
0°	9575	8231	0.954	0.73	1337
5°	9532	8142	0.954	7.06	1384
10°	9363	7983	0.954	18.13	1362
15°	9290	7683	0.954	82.69	1525
20°	9120	7298	0.954	240.2	1584

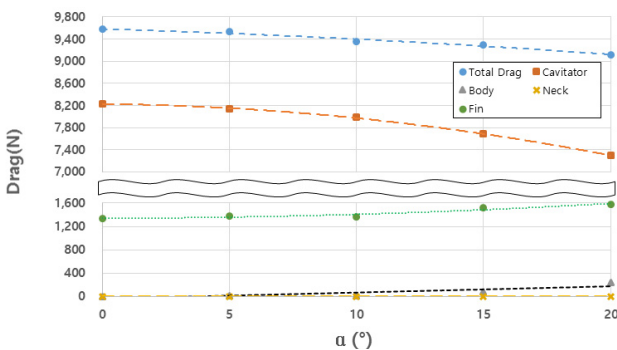


Fig. 14 Drag by component according to the α of the cavitator

α 절대값이 증가함에 따라, 제어핀에 작용하는 항력이 일정하게 유지되다가 15°일 때, 약 12%의 항력 상승이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. α 가 0°에서 10°까지는 공동이 비대칭적으로 발달하면서 상부 제어핀의 노출면적이 증가하고, -z방향의 노출면적이 감소하면서 제어핀에 작용하는 항력은 유사한 값을 가진다. 하지만, α 가 15°일 때부터는 상부제어핀의 노출면적이 증가한 반면, 하부제어핀의 노출면적은 크게 감소하지 않았기 때문에 제어핀에 작용하는 항력이 증가한 것으로 보인다.

α 절대값이 20°일 때, 몸체에 작용하는 항력은 전체 항력의 0.02%로 대세에 영향을 미치지 않는다. 하지만, 캐비테이터의 형상설계 및 초기 제어자세를 설정할 때, 캐비테이터의 받음각에 의해 몸체가 공동 밖으로 노출되어 항력에 영향을 미칠 수 있는 것과 상하부의 제어핀의 제어력이 상이할 수 있음을 고려하여야 한다.

3.2 몸체 받음각에 따른 공동 특성

초공동 수중운동체의 몸체 받음각(AOA)에 따른 공동의 형상 특성과 초공동 수중운동체에 작용하는 외력특성을 수치해석적으로 분석하였다. AOA는 0°에서 5°까지 1°씩 증가하며 해석을 수행하였다. Fig. 15는 AOA에 따라 발생하는 공동의 형상과 공동의 상을 윤곽도로 나타낸다.

AOA이 커짐에 따라, 발생하는 공동의 형상이 비대칭적으로 변형된다. 캐비테이터에서 형성되는 공동의 형상은 AOA이 증가하면서 +z 방향으로 체적이 증가하고, -z 방향으로 체적이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, AOA이 증가하면서 몸체의 하부가 공동 밖으로 노출되는 면적이 늘어남과 동시에, 상부 제어핀의 액침은 감소하는 반면, 하부 제어핀의 액침길이는 커지고 있음을 확인할 수 있다.

AOA가 1°일 때, 초공동 수중운동체의 하부 어깨가 공동 밖으로 노출되고, 길이 방향 85% 위치의 몸체 하부에서 공동의 형상이 마감되는 것을 확인할 수 있다. 초공동 수중운동체의 하부형상이 공동 밖으로 노출되는 면적이 늘어나고, +z방향 공동의 체적이 늘어남에 따라 하부 제어핀의 액침은 약 95%인 반면, 상부 제어핀은 30%만 노출되어 있는 것을 확인할 수 있다.

AOA가 2°일 때, 초공동 수중운동체의 목(neck)이 공동 밖으로 노출되고, 어깨에서 공동이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 생성된 공동은 길이방향 80% 위치의 몸체 하부에서 마감하였다. AOA이 1°와 비교하였을 때, 공동 밖으로 노출된 면적이 늘어난 것으로 확인할 수 있다. 이 때, 하부 제어핀의 액침은 100%인 반면, 상부 제어핀의 액침은 약 15%만 노출된다.

AOA가 5°일 때, 초공동 수중운동체의 Neck이 50% 이상이 공동 밖으로 노출되어 있으며, 길이방향 60% 위치의 몸체 하부에서 공동이 마감된다. 하부 제어핀의 액침은 100% 노출되어 있으며, 상부 제어핀의 액침은 공동에 다 잠겨져 제어력을 완전히 상실하였을 것으로 보인다.

AOA가 증가함에 따라 공동의 직경은 비대칭적으로 발달하게 된다. AOA가 증가함에 따라 +z방향의 공동의 반경은 커지고, -z방향의

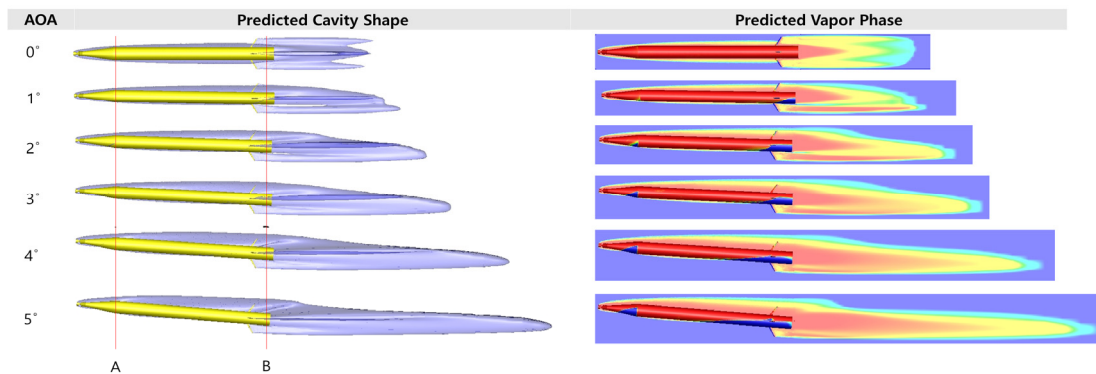


Fig. 15 Predicted Cavity Shape & Vapor phase according to AOA

공동의 반경은 작아진다. 이는, 캐비테이터 받음각에 의해 공동의 형상이 비대칭적으로 형성될 뿐만 아니라, 캐비테이터에서 생성된 공동이 몸체 하부의 형상과 간섭됨에 따라 완전하게 발달하지 못하고 마감되기 때문이다.

AOA에 따른 공동의 형상을 길이의 관점으로 보면, 초공동 수중운동체 몸체를 중심으로 +z방향의 공동의 길이는 줄어들고, -z방향의 공동의 길이는 늘어난다. 이는, AOA이 0°일 때는 캐비테이터에서 생성된 공동이 상하부의 제어핀까지 대칭을 이루며 도달하여, 상하부의 제어핀의 액침면적이 동일하기 때문에, 제어핀에 의해 생성되는 공동의 크기가 동일하다. 반면, AOA이 증가함에 따라, 상부 제어핀의 액침은 감소하고, 하부 제어핀의 액침은 증가한다. 따라서, 상부 제어핀에 의해 생성되는 공동의 크기는 감소하는 반면, 하부 제어핀에 의해 생성되는 공동의 크기는 증가하여 -z방향의 공동의 길이가 늘어난다.

Fig. 15에서 단면A는 초공동 수중운동체의 어깨부를 나타내고, 단면 B는 길이방향 95% 지점을 나타낸다. Fig. 16은 단면 A와 B에서 공동의 상을 윤곽도로 보여주고 있다. 0°에서 몸체를 중심으로 원형을 이루고 있던 공동의 형상이 AOA가 증가함에 따라 공동의 형상이 점점 변형되어, 몸체 아래쪽의 체적은 감소하고 몸체 위쪽의 체적이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 10은 초공동 수중운동체의 몸체 받음각(AOA)에 따른 항력, 양력 및 y축 모멘트 값을 보여준다. Fig. 17은 AOA에 따른 전체 항력과 압력항력 및 마찰항력 성분을 나타낸 것이다. AOA가 증가함에 따라 초공동 수중운동체의 저항이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. AOA가 0°에서 5°로 증가할 때, 전체 항력은 약 110% 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 압력항력은 82% 마찰항력은 2000% 증가하였다. 압력항력이 증가한 이유는, AOA가 0°일 때는 유동방향과 초공동 수중운동체의 진행방향이 동일하여, 캐비테이터에만 압력항력이 작용하였지만, AOA가 증가함에 따라 몸체의 압력면적이 증가하여, 몸체에 작용하는 압력항력이 증가하였기 때문이다.

AOA가 증가함에 따라 마찰항력이 비약적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는, 0°일 때는, 캐비테이터에서 발생하는 초월공동이 몸체 전체를 덮으면서 일부 노출된 제어핀에서만 마찰항력이 발생하였지만, AOA가 증가함에 따라 공동 밖으로 노출된 몸체의 표면이 늘어남에 따라 전체 마찰항력이 증가하였다.

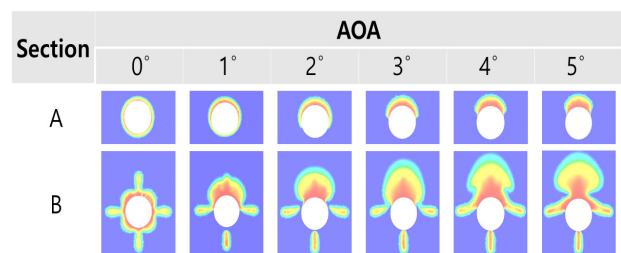


Fig. 16 Vapor phase at Section A and Section B

Table 10 Drag, Lift, and Moment according to AOA

α	Drag [N]	Lift [N]	Moment [N-m]
0°	9575	0	0
1°	10336	5019	4901
2°	12091	15171	8662
3°	13682	19634	1813
4°	16931	31754	3270
5°	20194	41520	3398

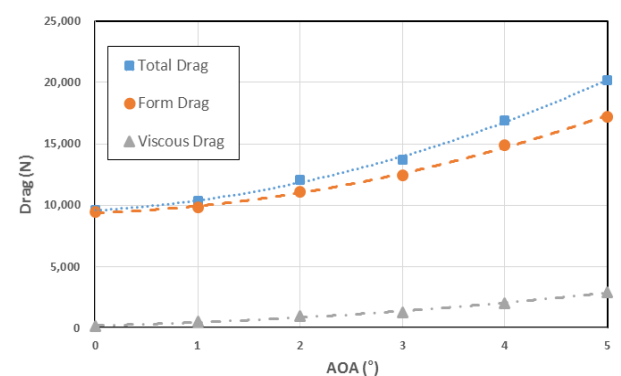


Fig. 17 Drag according to the angle of attack

Fig. 18은 AOA에 따른 초공동수중운동체의 전체양력과 압력과 마찰면에 의한 양력성분을 그래프로 나타낸 것이다. AOA가 증가함에 따라, 초공동 수중운동체에 작용하는 양력이 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 전체 양력의 98% 이상이 압력차에 의해 양력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는, 항력성분으로만 작용하던 압력항력이 초공동 수중운동체의 받음각에 의하여 양

력성분으로 나뉘어졌을 뿐만 아니라, 공동 비갈로 노출된 몸체가 물에 의해 부력을 받기 때문인 것으로 보인다.

Table 11는 초공동 수중운동체의 몸체 받음각(AOA)에 따른 각 구성부에 작용하는 항력을 표로 보여주고 있으며, Fig. 19는 AOA에 따른 각 구성부의 항력을 그래프로 나타낸 것이다.

AOA가 0°일 때, 항력의 약 86%를 캐비테이터가 차지하고, 제어핀에 작용하는 항력이 약 14%를 차지한다. 캐비테이터에서 발생한 공동이 몸체 전체를 덮고 있기 때문에, 몸체에 작용하는 항력은 거의 없고, 캐비테이터 전면부와 공동 비갈로 일부 노출된 제어핀의 액침이 전체 저항의 99% 이상을 차지한다.

AOA가 증가함에 캐비테이터에 작용하는 항력은 큰 변화가 없는 반면, 몸체에 작용하는 항력은 만배 이상 증가하였고, 제어핀에 작용하는 항력은 약 130% 증가한 것을 볼 수 있다. 몸체에

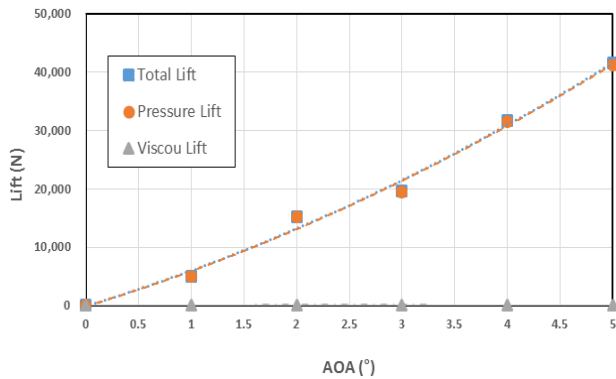


Fig. 18 Lift according to the angle of attack

Table 11 Drag according to AOA

AOA	Drag [N]				
	Total	Cavitator	Neck	Body	Fin
0°	9575	8231	0.954	0.717	1337
1°	10336	8219	1.437	438	1671
2°	12091	8209	1.436	1713	2160
3°	13682	8209	0.953	3536	1931
4°	16931	8194	0.952	6144	2588
5°	20194	8187	0.950	8936	3066

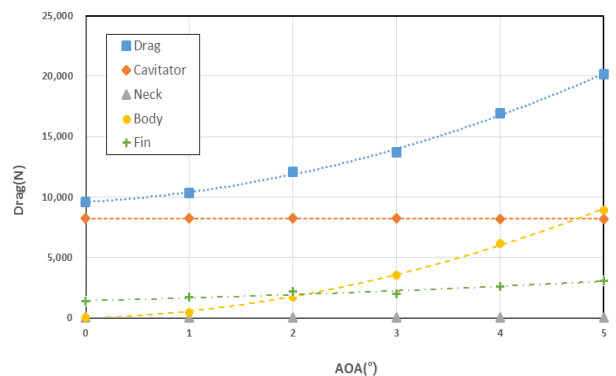


Fig. 19 Drag by component according to AOA

작용하는 항력이 증가하는 것은 받음각에 의해 몸체가 유동과 직접 닿음으로 인해 몸체의 압력면적이 증가하여 몸체에 작용하는 압력항력이 발생하였으며, 몸체가 공동 비갈로 노출되는 면적이 증가하여 마찰항력이 증가하였기 때문이다. AOA이 5°일 때는, 캐비테이터에 작용하는 항력보다 몸체에 작용하는 항력이 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

AOA가 증가함에 따라 제어핀에 작용하는 항력이 증가하는 것은, +z방향 공동의 체적이 증가하고, -z방향 공동의 체적이 감소하였기 때문이다. 이로 인해, 상부 제어핀은 공동에 의해 덮히는 반면, 하부 제어핀은 공동 비갈로 다 노출되었다. 또한, 좌우 제어핀 역시 공동 비갈로 노출된 상태에서 압력면적이 증가하였기 때문에 제어핀에 작용하는 항력이 증가한 것으로 보인다.

Table 12는 AOA에 따른 각 구성부에 작용하는 y축 모멘트를 표로 보여주고 있으며, Fig. 20은 AOA에 따른 각 구성부의 y축 모멘트를 그래프로 나타낸 것이다. y축 모멘트는 AOA가 증가함에 따라 일정한 경향성을 가지지 않는다. 일반적으로 수중운동체가 받음각을 가지면, 받음각이 커짐에 따라 모멘트가 증가하는 경향성을 가진다. 하지만, 본 연구의 해석결과에서는 0°에서 2°일 때 까지는 y축 모멘트가 증가하다가, 3°일 때 급격히 감소한 뒤, 다시 AOA이 증가함에 따라 y축 모멘트가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 구성부에 따른 영향을 살펴보면, 초공동 수중운동체의 AOA에서는 캐비테이터가 모멘트에는 큰 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있다. 오히려, 초공동 수중운동체에 발생하는 모멘트는 몸체와 제어핀에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Table 12 Moment according to AOA

AOA	Moment [N-m]				
	Total	Cavitator	Neck	Body	Fin
0°	0	0	0	0	0
1°	4901	0.60	3.86E-05	3745	1155
2°	8662	1.09	2.55E-05	5757	2904
3°	1813	1.39	4.90E-05	-906	2718
4°	3270	1.79	3.31E-06	-1468	4736
5°	3398	2.27	4.16E-05	-2243	5639

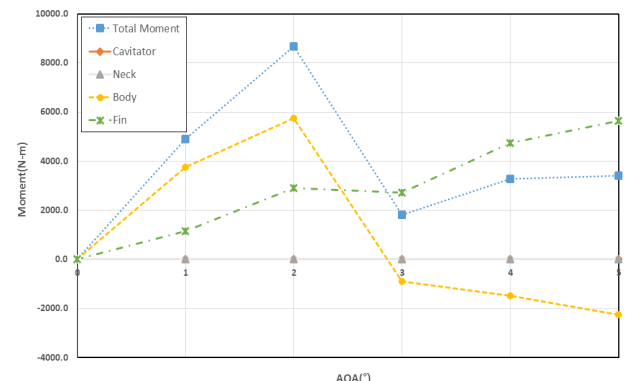


Fig. 20 Moment by component according to AOA

AOA가 0°에서 2°일 때, 받음각이 커짐에 따라 y축 모멘트는 증가한다. 이는 몸체와 제어핀이 받음각을 받음에 따라 발생하는 모멘트가 커지기 때문이다.

AOA가 3°일 때, y축 모멘트가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 초공동 수중운동체의 어깨와 몸체 아래부분이 공동 바깥으로 노출되는 면적이 커짐에 따라 항력이 커지게 되고, 몸체 아래부분에 작용하는 항력이 -y축 방향의 모멘트를 발생시키기 때문이다. 또한, AOA가 3°일 때 상부 제어핀의 액침이 공동에 90% 이상 잠기게 되어, 상부제어핀은 항력을 거의 받지 못하게 된다. 따라서 전체 제어핀에 작용하는 모멘트는 받음각이 증가하였음에도 불구하고 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

AOA가 4°일 때부터는 초공동 수중운동체의 y축 모멘트가 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 몸체는 하부에 작용하는 항력에 의해 -y축 방향 모멘트가 증가하고 있지만, 좌우 측면의 제어핀의 받음각이 커짐에 따라 전체 제어핀에 작용하는 y축 모멘트가 증가한 것으로 보인다. 몸체에 의해 감소하는 모멘트의 크기보다 제어핀에 의해 증가하는 모멘트의 크기가 더 크기 때문에, 전체적으로 y축 모멘트가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

수중운동체의 조종성능을 분석하기 위해서는 AOA와 제어핀의 받음각에 따른 항력, 양력, 그리고 모멘트의 경향성을 통해 유체력계수를 도출한다. 일반적인 수중운동체는 AOA와 제어핀의 받음각에 따라 각 항목들이 일정한 경향성을 가진다. 하지만, 초공동 수중운동체는 캐비테이터의 받음각, AOA에 따라 공동의 형상이 변하게 되어 공동의 형상이 항력과 양력, 그리고 모멘트에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 제어기 설계를 위한 유체력계수를 도출하기 위해서는 초기제어 자세를 정의하고 정의된 범위 내에서 유체력계수를 도출할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 결론

초공동 수중운동체의 실용화를 위해서는 초공동 수중운동체의 조종성능을 분석하여야 한다. 조종성능을 분석하기 위해서는, 초공동 수중운동체의 주행을 위한 조종인자와 그 영향을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구는 초공동 수중운동체의 초월공동 형상과 외력특성을 계산할 수 있는 다상유동해석모델을 개발하였고, 이를 활용하여 초공동 수중운동체의 주요 조종인자인 캐비테이터의 받음각(α)과 몸체 받음각(AOA)에 따른 공동의 형상특성과 외력특성을 연구하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

첫째, 캐비테이터의 받음각이 커짐에 따라 발생하는 공동의 형상은 비대칭적이며, 비대칭적인 공동의 형상으로 인하여 초공동 수중운동체의 몸체의 일부가 공동 바깥으로 노출될 뿐만 아니라, 제어핀의 액침의 길이 또한 차이가 나는 것을 확인하였다.

둘째, 캐비테이터의 받음각에 따른, 비대칭적인 공동의 형상으로 인하여 몸체의 항력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 캐비테이터의 유동방향 투영면적이 감소하여 캐비테이터의 항력 감소폭이 더 크기 때문에, 전체 항력은 감소하였다.

셋째, 캐비테이터의 받음각이 커짐에 따라 항력은 감소하였고, 양력과 모멘트는 일정한 경향으로 증가하였다. 캐비테이터 받음각에 따른 항력, 양력, 모멘트 경향성은 유체력 계수를 도출하는데 활용할 수 있다.

넷째, 초공동 수중운동체의 몸체 받음각이 커짐에 따라 공동은 비대칭적으로 형성된다. 받음각이 3°이상이 되면 상부 제어핀은 공동에 잠기게 되어 제어력을 상실한다. 또한 하부 제어핀은 100% 공동 밖으로 노출되며, 어깨와 몸체 또한 공동 밖으로 노출되는 면적이 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 초공동 수중운동체가 특정 Trim을 가지면서 주행할 경우, 비대칭적으로 형성되는 공동이 몸체 전체를 덮는 동시에, 제어핀을 통한 제어가 가능하도록 몸체와 제어핀의 형상을 설계할 필요가 있다.

다섯째, 초공동 수중운동체의 몸체 받음각에 따라, 몸체와 제어핀이 공동 밖으로 노출되는 면적이 늘어나면서, 압력항력과 마찰항력 모두 증가하였다. 해석모델에서는 받음각이 3° 이상이 되면 하부 몸체에 작용하는 항력의 크기증가와 상부제어핀이 공동에 잠기는 것으로 인하여 모멘트가 급격히 감소하며, 경향성을 상실하였다. 따라서, 유체력계수를 도출하는 단계이전에, 초공동 수중운동체의 가용 자세범위를 충분히 정의하여 경향성을 가진 범위 내에서 제어할 수 있도록 세심한 검토가 필요하다.

향후, 제어핀의 받음각에 따른 공동과 항력 특성을 수치적으로 해석하고, 초공동 수중운동체의 운동방정식을 모사하여, 유체력계수를 도출할 필요가 있다.

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 Naval Architecture 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.
- Gary, J.B., Jozsef, B., Balint, Vanek, & Roger E.A., 2006. Control of high-speed underwater vehicle. *Control of Uncertain Systems: Modeling, Approximation, and Design*, 329, pp.26-44.
- Guzevsky, L.G., 1983. Approxiamtion dependences for axisymmetric cavities behind cones, *Hydrodynamic Flows and Wave Processes* [in Russian], Institute of Thermal Physics, Sib. Branch, The Academy of Sciences of the USSR, Novosibirsk, pp.82-91.
- Jeong, S.W., Park, S.T., Ahn, B.K., 2018. An experimental study on hydrodynamic characteristics of a control fin for a supercavitating underwater vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(1), pp.75-82.
- Kim, H.T., Choi, E.J., Kang, K.T. & Yoon, H.G., 2019. Numerical analysis of the cavitation around an underwater body with control

fins. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(4), pp.298-307.

Kim, J.H., Jeong, S.W., Ahn, B.K. & Jeon, Y.H., 2016. A study on natural supercavitating and drag characteristics of axisymmetric cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(6), pp.465-472.

Kinzel, M.P., Krane, M.H., Kirschner, I.N. & Money, M.J., 2017. A numerical assessment of the interaction of a supercavitating flow with a gas jet. *Ocean Engineering*, 136, pp.304-313.

Logvinovich, G.V., 1973. Hydrodynamics of flows with free boundaries, Halsted Press : Sydney.

Park, H.J., Kim, J.H. & Ahn, B.K., 2018. Numerical analysis of axisymmetric supercavitating underwater vehicle with the variation of shape parameters. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(6), pp.482-489.

Schnerr, G. & Sauer, J., 2001. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. *4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA.

Tulin, M., 1953. *Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies*. Navy dept.: Washington D.C.

Waid, R.L., 1957. Water tunnel investigation of two-dimensional cavities, *CalTech. Hydrostatic*. Laboratory Report No E-73.4.

Wu, T.Y., 1955. A free streamline theory for two-dimensional fully cavitating hydrofoils. *Calif inst of Tech Hydrodyn. Lab Report No 21-17*.

Xulong, Y. & Tao, X., 2016. Hydrodynamic characteristics of a supercavitating vehicles's aft body. *Journal of Ocean Engineering*, 114, pp.37-46.



전 윤 호



박 정 훈



전 관 수