

초공동 수중운동체의 설계 제약조건에 관한 연구

김선홍·김낙완[†]
서울대학교 조선해양공학과

A Study on Design Constraints of a Supercavitating Underwater Vehicle

Seonhong Kim·Nakwan Kim[†]

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

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.

This paper defines the design constraint in consideration of the dynamic characteristics and stability in the longitudinal direction of a supercavitating vehicle. Available range of the design variables is calculated by numerical simulation and the cavity modeling of vehicle dynamics is performed first. Configuration parameters of the supercavitating vehicle to determine the vehicle dynamics and characteristics of the cavity are defined as design variables. Design constraints are supercavitation, trim velocity, stability and vehicle dynamics in transition phase. Numerical results show that in accordance with the change of the design variables, the proposed design constraints reflect the physical characteristics of the supercavitating vehicle. This research finds the design region where the constraints of supercavity and the trim velocity are satisfied, and the stability analysis refines the design results by excluding the region where the stability is not guaranteed. The stability analysis is particularly important for a vehicle with the short fin span.

Keywords : Supercavitating underwater vehicle(초공동 수중운동체), Design constraints(설계 제약조건), Design variables(설계 변수), Stability constraint(안정성 제약조건)

1. 서론

기존의 수중운동체는 물과 완전히 접촉한 상태로 운동하며 이 때 물에 의한 마찰저항으로 인하여 운동의 속력 한계가 존재한다. 초공동 기술은 수중운동체를 공동(cavitation)으로 감싸 물과의 접촉면을 줄여 마찰저항을 감소시킴으로써 수중운동체 주행 속도를 크게 증가시킬 수 있는 기술이다. 초공동 기술은 군사선진국을 필두로 1970년대부터 꾸준히 연구되고 있는 분야이다. 최근 국내에서도 초공동 관련 기초연구가 국방과학연구소 주관으로 꾸준히 수행되고 있고 관련 논문도 다수 발표된 바 있다(Ahn, et al., 2012; Kim & Lee, 2014; Kim, et al., 2013; Kim & Kim, 2014; 2015a; 2015b; 2015c; Lee, et al., 2013). 하지만 그 수준이 기초연구단계이고 초공동 수중운동체 설계 관련 연구는 전무한 실정이다. 국외에서 초공동 설계 관련 논문으로는 gradient-based 최적화 알고리즘 기반의 캐비테이터 형상 최적화 기법(Choi, et al., 2005)이 연구된 바 있고 실린더형 shell의 좌굴 안정성을 고려한 최적 설계 기법에 대한 연구(Ahn & Ruzzene, 2006)도 수행된 바 있다. Alyanak, et al. (2006)은 초공동 수중운동체의 크기, 형상 및 구조적 형상(configuration)에

관한 연구를 수행하였지만 운동체의 주행성능보다는 구조적인 관점에 초점을 맞추었다. Ahn, et al. (2010)은 조종(maneuvering) 제약조건을 고려하여 초공동 수중운동체의 형상(configuration) 최적화를 수행하였다. 하지만 제약조건에 사용된 운동체 동역학이 발사 초기 천이영역을 고려하지 않았고 제어판의 길이 및 위치를 결정할 때 운동체의 안정성이 고려되지 않았다.

본 논문에서는 초공동 수중운동체의 최적 설계를 위한 선행연구로서 운동체 설계 시 고려해야 하는 설계 제약조건에 관한 연구를 수행하였다. 2장과 3장에서는 설계 제약조건을 결정하는데 필요한 공동의 모델링과 운동체의 동역학 모델링에 대해서 서술하였다. 운동체 동역학 모델링은 선형 모델링과 천이구간 모델링을 고려하였다. 4장에서는 본 논문의 주요 연구내용인 설계 제약조건에 대한 연구 결과가 나타나 있다. 4.1절에서는 설계 변수를 정의하고 4.2 - 4.6절에서는 설계 제약조건에 대해 서술하였다. 특히 4.6절에서는 운동체의 종축 안정성을 고려하여 핀의 길이를 결정하는 안정성 제약조건에 대해 서술하였고 이를 반영한 설계 시 운동체의 안정성을 확보할 수 있다. 5장에서는 4장에서 서술한 각각의 제약조건 하에서 수치시뮬레이션을 수행하여 주요 설계변수인 캐비테이터 직경과 운동체 변경 또는 핀 길이의 변화가 초공동 수

중운동체의 운항 상태에 어떻게 작용하는지를 조사하고 이를 통해 설정된 제약조건들의 타당성을 간접적으로 확인하였다.

2. 공동 모델링

초공동 수중운동체와 기존의 수중운동체와의 차이는 공동의 유무이며 공동의 크기와 형상은 운동체와 물의 접촉면을 결정하여 운동체에 작용하는 유체력을 계산하는데 중요한 정보가 된다. 공동은 운동체 전면부에 위치한 캐비테이터에서 생성되어 축대칭 형상으로 성장한다고 가정한다. 공동의 전체적인 형태는 이 원을 공동의 중심축에 따라 적분하여 얻어진다 (Fig. 1).

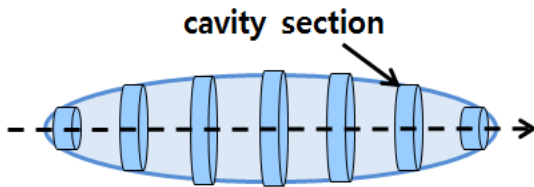


Fig. 1 Axisymmetric cavity and cavity sections

공동의 동역학적 특징을 결정하는 중요한 파라미터는 공동수 σ 이고 분사형 공동의 경우 공동수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_c}{0.5\rho V^2} \quad (1)$$

p_∞ 와 p_c 는 각각 동일수심의 정압과 공동 내 압력이고 단위는 N/m^2 이다. 자연공동의 경우 공동 내 압력은 물의 증기압과 같다. V 는 운동체 속도의 크기, ρ 는 유체의 밀도이다. 공동의 모델링은 Logvinovich (1972), May (1975), Savchenko (1998) 등에 의해 연구되고 각각의 모델링 및 비교 결과는 Kim and Kim (2015)의 초공동 수중운동체 통합 모델링 연구에 자세히 나와있으며 본 논문에서는 본 연구에서 사용된 May (1975)의 모델링을 간단히 서술한다. Garabedian (1956)의 모델은 공동의 길이(L_c) 및 최대 반지름(R_{max})을 캐비테이터 항력계수(C_D)을 이용하여 예측할 수 있고,

$$\frac{L_c}{2R_n} = \frac{1}{\sigma} \sqrt{C_D \ln \frac{1}{\sigma}} \quad (2)$$

$$\frac{R_{max}}{R_n} = \sqrt{\frac{C_D}{\sigma}} \quad (3)$$

여기서, R_n 은 캐비테이터의 반지름이다. May (1975)는 이를 이용하여 공동의 형상을 나타내었다.

$$R_c(x) = R_{max} \left(1 - \left(\frac{x - L_c/2}{L_c/2} \right)^2 \right)^{1/24} \quad (4)$$

May의 모델링은 공동의 크기와 형상을 모든 공동수에 대해서 비교적 정확하게 표현할 수 있고 계산이 간단하다는 장점이 있기 때문에 본 연구에서 이용하였다.

3. 초공동 수중운동체 수학적 모델

본 연구에서는 초공동 수중운동체의 수학적 모델을 정상상태와 천이구간으로 나누어 사용하였다. 초공동 수중운동체는 발사 후 천이구간을 거쳐 가속운동을 하다가 운동체에 작용하는 저항과 추력이 평형을 이루어 등속도 운동을 하는 정상상태에 도달하게 된다. 이 때 운동체의 속도는 최대가 되고 이를 트림속도라고 정의한다. 종축선형모델은 정상상태인 트림속도에서 운동체의 종축 안정성에 관련된 제약조건을 결정하는데 이용되었고, 천이구간 모델링은 운동체 발사 초기의 천이구간에서의 유체력을 고려한 운동체 동역학 제약조건으로 사용된다.

3.1 종축선형모델

본 연구에서 쓰인 종축 선형모델은 Vaneek, et al. (2007)의 모델이다. Fig. 2는 초공동 수중운동체의 좌표계를 보여준다. 본 연구에서는 Fig. 2에 표시한 바와 같이 관성좌표계인 지구고정좌표계 $O_E - X_E Y_E Z_E$ 와 몸체고정좌표계 $O_B - X_B Y_B Z_B$ 를 사용한다. 초공동 수중운동체의 제어판은 전반부에 위치한 캐비테이터와 운동체 후부에 위치한 4개의 핀으로 이루어져 있다. 캐비테이터는 피치축 방향으로 1자유도 운동을 할 수 있고 4개의 핀 역시 각각의 축을 중심으로 한 1자유도 운동을 할 수 있다.

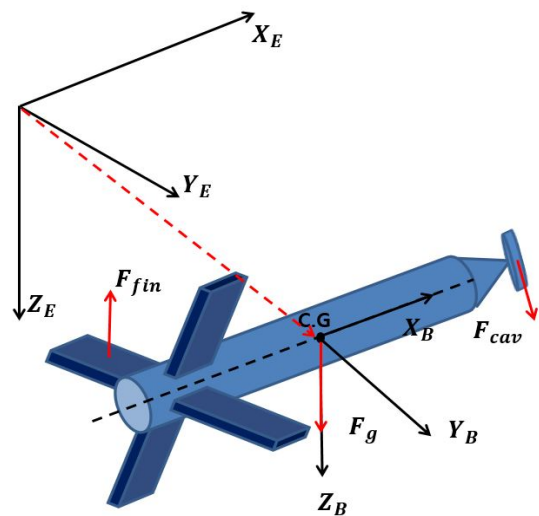


Fig. 2 Coordinate system of a supercavitating vehicle and forces acting on the vehicle

초공동 수중운동체의 종축 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\dot{w} = F_{cav} + F_{fin} + F_g \quad (5)$$

$$I_{yy}\dot{q} = -F_{cav}X_{cg} + F_{fin}x_{fin} \quad (6)$$

여기서 M, I_{yy} 는 각각 운동체 질량과 y축 관성모멘트이다. w, q 는 각각 상하동요속도와 종동요 각속도이다. 식의 우변은 각 축에 작용하는 외력을 나타낸다. 밀 첨자 cav, fin, g는 각각 캐비테이터와 핀에 작용하는 유체력과 중력을 나타낸다. x_{cg}, x_{fin} 는 각각 무게중심에서 캐비테이터 및 핀까지의 거리를 나타낸다. 제어판에 작용하는 유체력은 운동체의 상태(속도, 자세) 및 공동수에 의해 결정되며 선형화하면 다음과 같이 표현된다.

$$F_{cav} = \frac{1}{2}\rho A_c V^2 C_x \alpha_c \quad (7)$$

$$F_{fin} = \frac{1}{2}n_f \rho L_{fin}^2 V^2 C_f \alpha_f \quad (8)$$

여기서, A_c, L_{fin} 은 각각 캐비테이터 넓이, 핀 스패ん길이이며 v 는 각 제어판에서의 속도이고 선형화하면 운동체의 속도와 같다. n_f 는 핀 개수이며 본 연구에서는 수평축만을 고려하고 그 값은 20이다. C_x, C_f 는 각각 캐비테이터 항력계수 및 핀 양력계수의 기율기이다. 캐비테이터 항력계수는 공동수 σ 에 의해 결정되어 $C_x = C_{x0}(1 + \sigma)$ 로 표현되며 원판형 캐비테이터의 경우 $C_{x0} = 00.82$ (Logvinovich, 1972)이다. 핀의 양력계수의 기율기는 Kirschner, et al. (2002)의 연구를 이용하여 결정할 수 있다. α_c, α_f 는 각각의 받음각으로 다음과 같이 표현되며 δ_c, δ_f 는 캐비테이터와 핀의 편향각, θ 는 운동체 종동요각이다.

$$\alpha_c = \left(\frac{w}{V} - \frac{qx_{cg}}{V} + \theta + \delta_c \right) \quad (9)$$

$$\alpha_f = \left(\frac{w}{V} - \frac{qx_{fin}}{V} + \theta + \delta_f \right) \quad (10)$$

핀과 캐비테이터의 받음각 및 편향각이 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나있다.

종축 운동방정식을 상태공간 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} z \\ \theta \\ w \\ q \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -V & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{(C_1 - C_2)}{M} & \frac{(C_1 - C_2)}{MV} & \frac{(-Cx_{cg} + C_2x_{fin})}{MV} \\ 0 & \frac{(-Cx_{cg} + C_2x_{fin})}{I_{yy}} & \frac{(-C_1x_{cg} + C_2x_{fin})}{I_{yy}V} & \frac{(C_1x_{cg}^2 - C_2x_{fin}^2)}{I_{yy}V} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{C_1}{M} & -\frac{C_2}{M} \\ \frac{-C_1}{I_{yy}}x_{cg} & \frac{C_2}{I_{yy}}x_{fin} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, C_1, C_2 는 간단히 표현하기 위해 사용된 계수이며 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{1}{2}\rho A_c V^2 C_x, \quad C_2 = \frac{1}{2}\rho L_{fin}^2 V^2 C_f \quad (14)$$

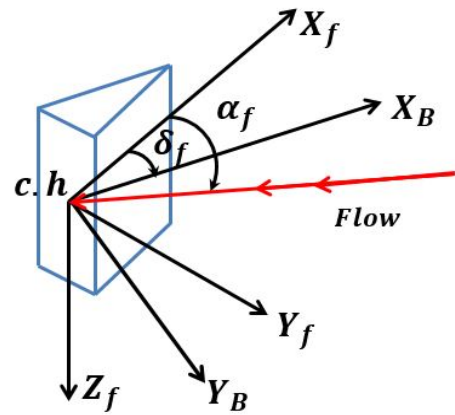


Fig. 3 Angle of attack and deflection angle of fin

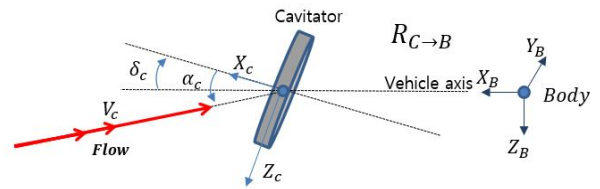


Fig. 4 Angle of attack and deflection angle of cavitator

3.2 1자유도 천이구간 모델

본 연구는 초공동 수중운동체의 최적 설계를 위한 선행연구로서 운동체 설계 시 고려해야 하는 설계 제약조건에 관한 연구이다. 그렇기 때문에 다양한 항주를 하는 상황을 가정하지 않고 발사 후 직진 주행을 하여 목표지점에 도달하기까지의 시간을 최소화

화하는 운동체 설계를 목표로 한다. 따라서 1자유도 천이구간 모델은 전진방향 운동방정식만을 고려하여 운동체의 속도 및 위치를 계산하는데 이용된다. 천이구간 모델링은 기본적으로 Kim and Kim (2015)의 천이구간 모델링을 1자유도로 축소한 것과 같다. 전진방향 1자유도 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\dot{u} = \delta T + F_c + F_f + F_{wet} \quad (15)$$

여기서, $\delta T, F_{wet}$ 은 각각 추력과 운동체 몸체에 작용하는 유체력이고 F_c, F_f 는 각각 캐비테이터와 핀에 작용하는 항력이다. 추력은 전진방향으로 작용하며 크기 및 지속시간은 4.2절의 추진기관 제약조건에서 서술한다.

운동체 몸체에 작용하는 유체력은 발사 초기 천이구간에서 완전한 초월공동이 형성되지 않았을 때 운동체 몸체가 물과 접촉함에 따라 발생하는 힘이다. Fig. 5는 전진방향으로 작용하는 동유체력을 보여준다. 전진방향으로 작용하는 동유체력 중 부가질량에 의한 동유체력과 압력저항은 캐비테이터에만 작용한다. 캐비테이터에 작용하는 압력저항은 3.1절에서 서술한 수직방향 힘과 마찬가지로 방법으로 결정하였고 가속운동에 의한 동유체력은 Fan, et al. (2001)의 부가질량 계수를 사용하였다.

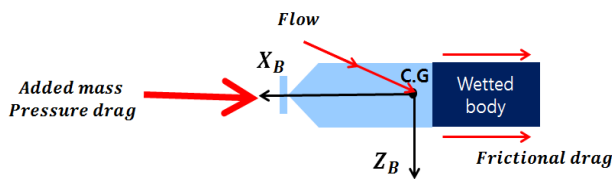


Fig. 5 Hydrodynamic forces acting on X-axis

운동체 침수부에 작용하는 압력저항은 캐비테이터에 작용하는 압력저항에 비해 매우 작기 때문에 무시하였다. 마찰저항은 운동체 몸체의 침수부에 작용하며 마찰저항계수는 ITTC line (Newman, 1977)을 통해 계산할 수 있다. 초공동 수중운동체의 주행상황에서는 레이놀드수가 최소 부터 까지 비교적 큰 영역에서 주행하기 때문에 ITTC line을 통해 마찰저항계수를 계산한다. 식 (16)은 마찰저항의 크기를 나타내며 식 (17)은 ITTC line을 통해 구한 마찰저항계수를 나타낸다.

$$D_F = \frac{1}{2} \rho S_{wet} V^2 C_F \quad (16)$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (17)$$

여기서, S_{wet} 은 운동체 몸체의 침수면적이고 이는 2장의 공동 모델링을 통해 계산한 공동의 크기 및 반지름과 운동체 형상을 통해 계산할 수 있다. Re 는 레이놀드수이며 운동체 몸체의 X_B 방

향 침수길이를 무차원화한 값이다. ρ 는 유체의 밀도를 나타내며 여기에서는 물의 밀도이다.

4. 설계 제약조건

4.1 설계 변수 설정

설계 제약조건을 설정하기에 앞서 운동체 설계에 필요한 수치들 중 설계 변수인 파라미터와 이미 알고 있거나 설계 변수의 함수로 나타낼 수 있는 수치들이 무엇인지 구분해야 한다.

운동체 설계에 필요한 파라미터 및 물리량들은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 운동체 치수를 결정하는 파라미터로 Fig. 6에 나타내었다. 운동체 길이 및 반지름 등 전반적인 운동체 치수에 관련된 파라미터와 캐비테이터 반지름, 핀 길이 및 위치 등 제어판의 위치 및 사이즈에 관련된 파라미터로 구성되어 있다. 두 번째는 운동체의 물리량에 관련된 값인 운동체 질량, 무게중심, 관성모멘트 등이 있다. 세 번째는 운동체 추진기관의 성능을 결정하는 인자로 추력의 크기와 추력의 지속시간이 있다.

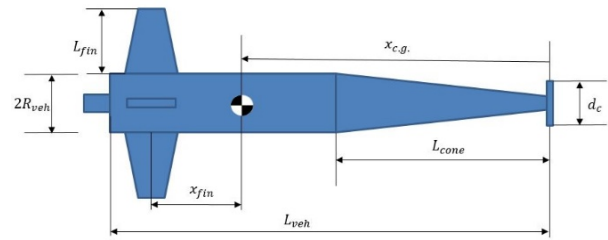


Fig. 6 Vehicle configuration parameters

본 연구의 목적은 초공동 수중운동체 설계 시 결정해야 할 운동체 설계 변수를 구하는 최적 설계의 기초연구이므로 설계 변수는 운동체 치수를 결정하는 파라미터로 정하였다.

$$d_{var} = [d_c, L_{veh}, R_{veh}, L_{cone}, L_{fin}, x_{cg}, x_{fin}] \quad (18)$$

Table 1 Nominal value of vehicle mass and configuration

Description	notation	value	unit
Vehicle mass	M	43.4	kg
Cavitator diameter	d_c	0.04	m
Vehicle length	L_{veh}	1.65	m
Cone length	L_{cone}	0.70	m
Vehicle radius	R_{veh}	0.07	m
Fin span length	L_{fin}	0.2	m
Fin root location	x_{fin}	0.59	m
Vehicle mass center location	x_{cg}	1.01	m

운동체 물리량은 운동체 치수 파라미터가 결정되면 결정되는 값으로 가정하였다. 추진기관의 성능을 결정하는 인자의 경우 4.2절에서 제약조건으로 설정하였다. 본 연구에서 쓰인 공칭값 (nominal value)를 Table 1에 나타내었다.

4.2 추진기관 관련 제약조건

추진기관의 제약조건을 설정하기 위해 다음을 가정하였다.

- 가정 1) 추진기관이 운동체 내부에서 차지하는 비율은 일정
- 가정 2) 추력의 크기는 추진기관의 면적에 비례
- 가정 3) 추력의 지속시간은 추진기관의 길이에 비례

가정 1)과 2)에 의해 추력의 크기는 운동체 반지름의 제곱에 비례하고 가정 1)과 3)에 의해 추력의 지속시간은 운동체의 길이에 비례한다. 추진기관 관련 제약조건(C_{thrust})는 식 (19), (20)으로 나타낼 수 있다.

$$C_{thrust}^1 = \delta T - N_1 \times R_{veh}^2 = 0 \tag{19}$$

$$C_{thrust}^2 = \delta T_{time} - N_2 \times L_{veh} = 0 \tag{20}$$

여기서, $\delta T, \delta T_{time}$ 은 각각 추력의 크기와 지속시간을 나타내며 N_1, N_2 는 비례상수이다.

4.3 초월공동 제약조건

초공동 수중운동체의 설계 시 가장 기본이 되는 조건으로 초월공동 형성 조건이 있다. 최대 속도에서 운동체의 핀 일부를 제외한 모든 부분은 공동으로 둘러 쌓인 상태(초월공동상태)를 유지해야 한다 (Fig. 7).

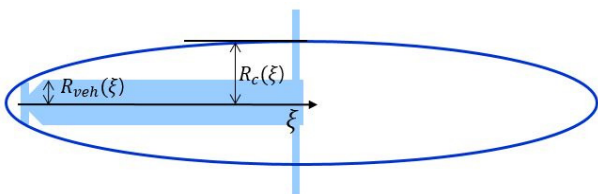


Fig.7 Condition for supercavity

초월공동 제약조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_{supcav} = R_c(\xi) - R_{veh}(\xi) \geq 0 \text{ at all } \xi \tag{21}$$

자연형 공동의 경우 최대속도가 상대적으로 낮은 경우 초월공동이 생성되지 않아 초월공동 제약조건에 의해 설계가능영역이 계산되지만, 분사형 공동의 경우 분사량을 원하는 만큼 늘릴 수 있다는 가정을 하면 이론상 어떠한 경우에도 초월공동을 형성할 수 있게 되어 초월공동 제약조건을 적용할 수 없다. 하지만 실제

로 가스 발생기의 가스 분사량 한계가 있기 때문에 가스발생기의 공동 생성 능력에 대해 다음을 가정한다.

- 가정 4) 분사형 초공동 수중운동체 설계시 가스 발생기의 성능은 생성할 수 있는 공동의 최대 길이로 판단한다.
- 가정 5) 가스 발생기의 공동 생성 능력은 설계된 운동체 길이의 두 배를 최대치로 갖는다.

이러한 가정을 통해 분사형 초공동 수중운동체에 초월공동 제약조건을 적용시킬 수 있다. 주어진 캐비테이터 크기에서 운동체 길이의 두 배 크기의 공동을 생성할 수 있는 공동수(도달가능한 최소 공동수)와 공동의 반지름을 계산하여 식 (21)의 제약조건을 적용한다.

4.4 최대속도 제약조건

최대속도 제약조건은 운동체가 정상상태에 도달하여 최대속도로 주행할 때 설계 변수가 최대속도에 미치는 영향을 고려하여 계산할 수 있다. 정상상태에서 초월공동 상태에 있는 운동체에 작용하는 유체력은 캐비테이터와 핀에 걸리는 항력이다. 운동체에 작용하는 항력과 추력이 평형을 이루면 운동체는 최대속도에 도달하게 되며 이를 수식으로 표현하면 식 (22)와 같고 이렇게 구해진 속도(u_{trim})는 정상상태에서의 트림속도이다.

$$C_{trim} = \delta T - F_c(u_{trim}) - F_f(u_{trim}) = 0 \tag{22}$$

4.5 안정성을 고려한 핀 길이 제약조건

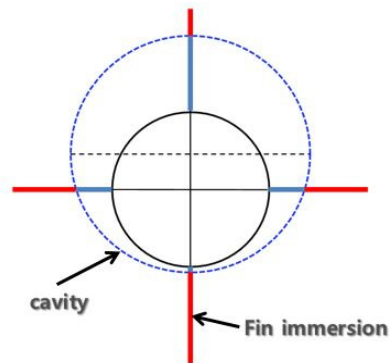


Fig. 8 Fin immersion depth related to cavity size

초공동 수중운동체는 일반적인 수중운동체나 항공기와 달리 캐비테이터가 운동체 전면에 위치하여 큰 압력을 받는다. 따라서 운동체 후부에 위치한 핀이 충분한 안정화 모멘트(stabilizing moment)를 생성하지 못하면 운동체가 불안정해진다. Fig. 8은 핀 액침깊이와 공동 크기와의 관련성을 보여준다. 초월공동상태에서는 공동의 크기가 최대화되고 이때 핀의 길이가 충분히 길지 않으면 핀 액침 깊이가 작아져 충분한 안정화 모멘트를 생성하지 못하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 설계 시 충분한 안정화 모

멘트를 형성할 수 있도록 최소 핀 길이를 결정하는 제약조건을 고려하였다. 핀 길이 제약조건을 결정하는 단계는 다음과 같다.

- 1 단계: 주어진 설계 변수(d_{var})에서 $C_{trim} = 0$ 을 만족하는 트림속도(v_{trim})을 구한다.
- 2 단계: 트림속도에서 운동체의 시스템행렬($A(d_{var})$)을 구한다.
- 3 단계: 시스템행렬($A(d_{var})$)의 고유값($E(A(d_{var}))$)을 확인하여 안정성을 판별한다.

시스템 행렬은 3.1절의 종축 선형모델에 서술되어 있다. 위의 단계를 거쳐 확인된 고유값($E(A(d_{var}))$)은 다음의 제약조건을 만족해야 한다.

$$C_{stab} = E(A(d_{var})) < 0 \quad (23)$$

4.6 천이구간 속도 제약조건

초공동 수중운동체는 발사 후 천이영역을 거쳐 초월공동상태에 도달하게 된다. 이 때 천이구간에서는 부분공동에 의한 유체력이 발생하는 비정상상태 운동이기 때문에 3.2절의 천이구간 모델을 사용하여 천이구간 제약조건을 구성하며 이는 다음의 전진 방향 운동방정식과 동일하다.

$$C_{dynamic} = \dot{u}(t) - \frac{1}{M}(\delta T + F_c + F_f + F_{wet}) = 0 \quad (24)$$

그 외 최적화를 실질적으로 수행하기 위해 필요한 거리, 시간 관련 제약조건은 현재 단계의 연구에는 필요하지 않기 때문에 서술하지 않았다.

5. 수치 시뮬레이션 결과

4장에서 서술한 각각의 제약조건 하에서 주요 설계변수인 캐비테이터 직경과 운동체 반경 또는 핀 길이의 변화가 초공동 수중운동체의 운항 상태에 어떻게 작용하는지를 조사하기 위하여 수치시뮬레이션을 수행하였다. 각 결과에서 축에 표현되지 않은 변수들은 Table 1의 값으로 고정시키고 계산하였다. 설계변수를 모두 변화시킬 경우 제약조건에 의해 결정된 설계 가능 영역의 경계를 표현하기도 어려울 뿐만 아니라 의미 있는 결과가 도출되지 않기 때문에 각각의 제약조건이 주요 설계 변수들의 변화에 따라 어떻게 작용하는지 직관적으로 파악할 수 있는 설계변수들만 변화시켜 각각의 제약조건들이 초공동 수중운동체의 동역학적 특성을 반영하고 있는지 평가하였다. 실제 최적화를 수행할 때는 모든 설계 변수들의 변화에 따라 제약조건들이 작용하여 설계 가능 영역을 판별한다. 또한 시뮬레이션을 수행한 설계변수의 범위는 의미 있는 결과를 보여주는 범위 또는 제약조건들의 경계가 나타나는 범위이다.

Fig. 9은 분사형 초공동 수중운동체의 경우 초월공동 제약조건

을 만족시키는 캐비테이터 지름과 운동체 반지름의 설계가능영역을 보여준다. 분사형의 경우 생성할 수 있는 공동의 최대 길이는 운동체 길이의 두 배를 가정했기 때문에 운동체 길이가 고정된 상태에서 캐비테이터의 크기가 커지면 두껍고 뭉툭한 형상이 되고 반대로 캐비테이터의 크기가 작아지면 얇은 형상이 된다. 따라서 운동체 반지름이 상대적으로 크면 공동의 반지름보다 운동체의 반지름이 커 초월공동 제약조건에 의해 부분공동으로 계산된다. 이러한 결과가 Fig. 9에 나타나있다. 초월공동 영역에서 운동체의 반지름을 키우면 운동체의 반지름이 공동 반지름보다 커져 부분공동 영역으로 가게 된다. 반대로 부분공동 영역에 존재하는 운동체의 반지름을 고정하고 캐비테이터의 지름을 키우면 공동의 반지름이 증가하여 초월공동 영역으로 이동하게 된다.

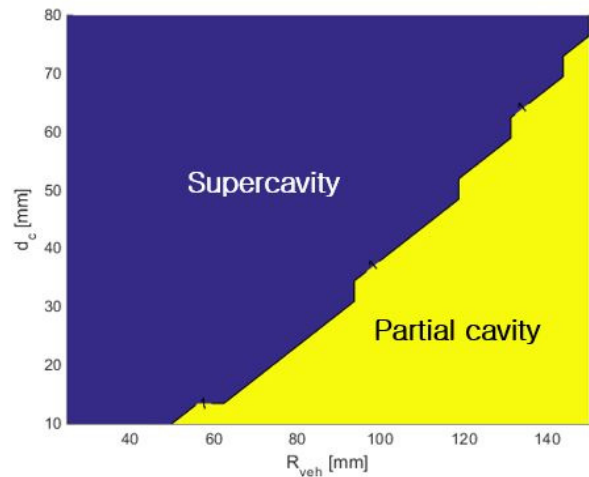


Fig. 9 Feasible design variable region based on supercavity constraint in the case of ventilated cavity

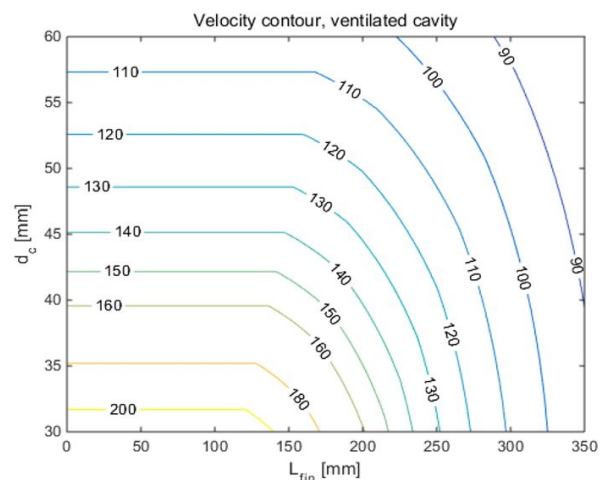


Fig. 10 Trim velocity contours based on velocity constraint in the case of ventilated cavity

Fig. 10과 11은 각각 분사형 공동과 자연공 공동의 경우에 대해서 최대속도 제약조건에 의해 결정된 속도 등고선을 보여준다. 분사형 공동의 경우 초월공동 제약조건에 언급한 바와 같이 운동

체 길이 두 배의 길이를 갖는 공동을 가정하였다. 등고선에는 핀의 길이를 키워도 최대속도가 일정한 영역이 존재하는데 이는 핀의 길이가 공동의 반지름보다 작아 저항이 발생하지 않는 영역이다. 자연형 공동의 경우 본 시뮬레이션 조건에서는 항상 초월공동이 생성되는 조건이 아니기 때문에 초월공동 제약조건에 의해 부분공동 영역은 설계가능영역으로 계산되지 않는다. 초월공동 제약조건은 공동의 길이뿐만 아니라 반지름에 대해서도 평가하게 된다. 그래프는 오른쪽으로 약간 불룩한 형태를 가지는데 이때의 캐비테이터 지름은 약 45mm이다. 이 점을 기준으로 위쪽(캐비테이터의 지름이 증가하는 방향)은 저항의 증가로 인해 공동의 길이가 운동체의 길이보다 적어져 부분공동에 해당하고 아래쪽(캐비테이터의 지름이 감소하는 방향)은 저항이 적어 낮은 공동수를 갖지만 캐비테이터의 지름이 적어 운동체의 반지름보다 작고 긴 공동을 형성하여 부분공동에 해당하게 된다.

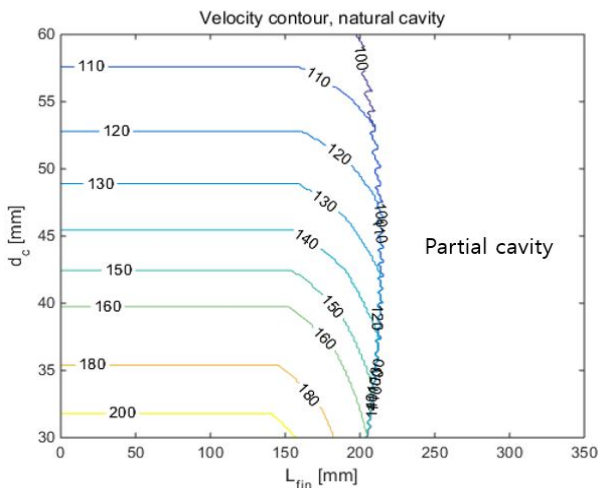


Fig. 11 Trim velocity contours based on velocity constraint in the case of natural cavity

Fig.12는 안정성 제약조건에 의해 계산된 핀의 길이와 캐비테이터 지름의 설계가능영역을 보여준다. Fig.11과 비교하면 핀의 안정성 제약조건을 고려하지 않은 상태에서는 부분공동 영역을 제외하고(그래프의 좌측) 모두 설계가능영역으로 계산되지만 안정성 제약조건을 고려하면 초월공동 영역에서도 일부는 핀의 길이가 운동체의 종축 안정성을 보장할 만큼 길지 않아 불안정한 영역으로 계산되는 것을 알 수 있다. 종축 안정성을 보장하는 핀의 길이는 운동체의 무게중심, 핀의 양력계수, 캐비테이터의 지름 등 여러 가지 요인에 의해 결정되기 때문에 핀의 액침부가 어느 정도 의 값을 가져야 하는지 수치적으로 말하기는 어렵다. 본 연구의 경우 안정성을 보장하는 액침부의 길이는 20%~40%사이의 값으로 나타났다. 하지만 액침부의 길이가 20%인 경우 운동체가 안정하기는 하나 조종성능이 좋지 않고 40%의 경우 핀에 걸리는 저항이 너무 커 비효율적이기 때문에 25~30%의 값이 적당하다고 판단된다. 하지만 이는 자연형 공동의 경우이고 분사형의 경우 액침 정도를 조절할 수 있기 때문에 상대적으로 길이가 긴 핀을 사용하여 공동의 크기를 조절하는 방식으로 안정성 및 조종성을 모두 확보할 수 있다.

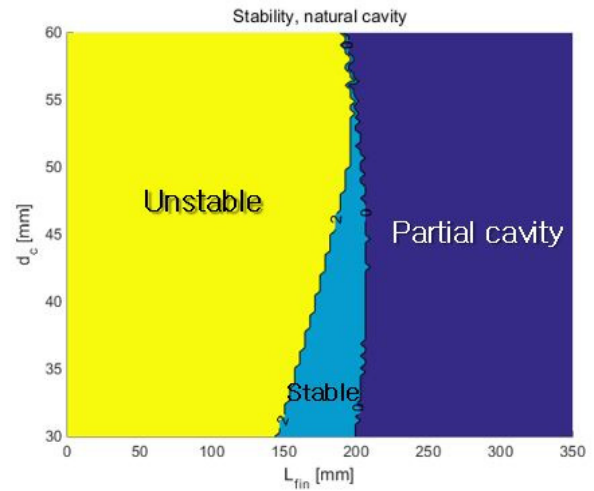


Fig. 12 Feasible design variable region based on stability constraint in the case of natural cavity

5. 결론

본 논문에서는 초공동 수중운동체의 설계 제약조건에 대한 연구를 수행하였다. 우선 설계 제약조건을 정의하는데 필요한 공동 모델링과 초공동 수중운동체 동역학 모델링을 수행하였다. 운동체 모델링은 종축 선형모델링과 천이구간 모델링으로 나누어 각각 안정성 제약조건과 천이구간 속도 제약조건에 이용되었다. 설계 변수는 운동체 치수에 관련된 파라미터로 결정하였다. 설계 변수는 추진기관 관련 제약조건, 초월공동 제약조건, 속도 제약조건, 안정성 제약조건, 천이구간 속도 제약조건 등에 의해 설계 가능 영역이 결정되고 이는 수치 시뮬레이션을 통해 구현되었다. 시뮬레이션 결과는 정의된 설계 제약조건이 다음과 같이 물리적으로 타당함 보여주었다.

- 1) 분사형 공동의 경우 캐비테이터 반지름이 커지면 공동의 반지름이 증가하여 초월공동 영역으로 이동함을 확인
- 2) 캐비테이터 지름 및 핀의 길이가 증가함에 따라 트림속도가 줄어들고 자연형의 경우 부분공동 영역으로 이동함을 확인
- 3) 초월공동 제약조건 및 트림속도 제약조건에 의해 설계가능영역으로 계산되는 설계 영역 중 핀의 길이가 짧은 경우는 안정성 제약조건에 의해 불안정한 영역으로 계산됨을 확인

본 연구는 초공동 수중운동체의 최적 설계의 기초연구로서 설계 제약조건에 관한 연구이다. 본 연구를 실제 최적화 문제에 적용할 때에는 운동체 내부의 기관, 발사 환경 및 운용 조건에 따라 설계 변수의 범위 제한이 결정되고 이러한 제약조건을 추가로 고려해야 한다.

후기

본 연구는 민군협력진흥원 민군기술협력센터(초공동화 수중운

동체의 수중주행 특성 모델링, 과제번호 : 14-BR-EN-31)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. & Ruzzene, M., 2006. Optimal Design of Cylindrical Shells for Enhanced Buckling Stability: Application to Supercavitating Underwater Vehicles. *Finite Elements in Analysis and Design*, 42(11), pp.967–976.
- Ahn, S.S. Ruzzene, M. Scorcelletti, F. & Bottasso, C. L., 2010. Configuration Optimization of Supercavitating Underwater Vehicles With Maneuvering Constraints. *Oceanic Engineering*, 35(3), pp.647–662.
- Alyanak, E. Grandhi, R. & Penmetsa, R., 2006. Optimum Design of a Supercavitating Torpedo Considering Overall Size, Shape, and Structural Configuration. *International Journal of Solids and Structures*, 43(3), pp.642–657.
- Choi, J.H. Penmetsa, R.C. & Grandhi, R.V., 2005. Shape Optimization of the Cavitator for a Supercavitating Torpedo. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29(2), pp.159–167.
- Fan, H. Zhang, Y. & Wang, X., 2011. Longitudinal dynamics modeling and MPC strategy for high-speed supercavitating vehicles. *electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on. IEEE*, pp.5947–5950.
- Garabedian, P., 1956. Calculation of Axially Symmetric Cavities and Jets. *Pacific Journal of Mathematics*, 6(4), pp.611–684.
- Kim, H.T. & Lee, H.B., 2014. A Numerical Analysis of Gravity and Free Surface Effects on a Two-Dimensional Supercavitating Flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.435–449.
- Kim, S. & Kim, N., 2014. Study on Dynamics Modeling and Depth Control for a Supercavitating Underwater Vehicle in Transition Phase. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), pp.88–98.
- Kim, S. & Kim, N., 2015a. Study on Ventilation Control for a Ventilated Supercavitating Vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp.206–221.
- Kim, S. & Kim, N., 2015b. Integrated Dynamics Modeling for Supercavitating Vehicle Systems. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(2), pp.346–363.
- Kim, S. & Kim, N., 2015c. Neural Network Based Adaptive Control for a Supercavitating Vehicle in Transition Phase. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), pp.454–466.
- Kim, J.H. Jang, H.G. Ahn, B.K. & Lee, C.S., 2013. A Numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-Dimensional Axisymmetric Cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.160–166.
- Kirschner, I.N. Kring, D.C. Stokes, A.W. Fine, N.E. & Uhlman, J.S., 2002. Control Strategies for Supercavitating Vehicles. *Journal of Vibration and Control*, 8(2), pp.219–242.
- Lee, H.B. Choi, J.K. & Kim, H.T., 2013. Numerical Analysis of Supercavitating Flows of Two-Dimensional Simple Bodies. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.436–449.
- Logvinovich, G., 1972. *Hydrodynamics of free-boundary flows, translated from Russian (NASA-TT-F-658)*. Washington D.C: US Department of Commerce.
- May, A., 1975. *Water entry and the cavity-running behavior of missiles, NAVSEA hydrodynamics advisory committee, Report.TR 75-2*. Silver Spring, Maryland: NAVSEA Hydrodynamics Advisory Committee.
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. MIT press: Massachusetts.
- Savchenko, Y.N., 1998. Investigation of high speed supercavitating underwater motion of bodies, High-speed Motion in Water, *AGARD Report 827, 20-1-20-12*. NASA.
- Vanek, B. Bokor, J. Balas, G.J. & Arndt, R.E., 2007. Longitudinal Motion Control of a High-speed Supercavitation Vehicle. *Journal of Vibration and Control*, 13(2), pp.159–184.

