

초공동 수중운동체의 조종면 조합에 따른 심도 및 직진 제어성능 분석

유범열¹⁾ · 모혜민¹⁾ · 김승균^{*,1)} · 황종현²⁾ · 박정훈³⁾ · 전윤호³⁾

¹⁾ 충남대학교 항공우주공학과 무인항공기시스템그룹

²⁾ LIG넥스원(주) 해양2연구소

³⁾ LIG넥스원(주) C4ISTAR.기계융합연구소

Performance Analysis on Depth and Straight Motion Control based on Control Surface Combinations for Supercavitating Underwater Vehicle

Beomyeol Yu¹⁾ · Hyemin Mo¹⁾ · Seungkeun Kim^{*,1)} · Jong-Hyon Hwang²⁾ ·
Jeong-Hoon Park³⁾ · Yun-Ho Jeon³⁾

¹⁾ *Unmanned Aircraft Systems Group, Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea*

²⁾ *Maritime R&D Center, LIG Nex1, Co., Ltd., Korea*

³⁾ *Mechanical R&D(Maritime), LIG Nex1, Co., Ltd., Korea*

(Received 15 December 2020 / Revised 18 February 2021 / Accepted 4 June 2021)

Abstract

This study describes the depth and straight motion control performance depending on control surface combinations of a supercavitating underwater vehicle. When an underwater vehicle experiences supercavitation, friction resistance can be minimized, thus achieving the effect of super-high-speed driving. Six degrees of freedom modeling of the underwater vehicle are performed and the guidance and control loops are designed with not only a cavitator and an elevator, but also a rudder and a differential elevator to improve the stability of the roll and yaw axis. The control performance based on the combination of control surfaces is analyzed by the root-mean-square error for keeping depth and straight motion.

Key Words : Supercavitating Underwater Vehicle(초공동 수중운동체), Underwater Vehicle Dynamics Modeling(수중운동체 동역학 모델링), Combination of Control Surfaces(조종면 조합), Depth and Straight Motion Control Performance(심도 및 직진 제어 성능)

1. 서론

초공동(supercavitation)이란 특정 온도에서 압력을 낮

* Corresponding author, E-mail: skim78@cnu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

춤으로써 액체가 기체로 기화된 버블로 구성된 공동이 수중운동체 전체를 감싸는 현상을 의미한다. 이러한 초공동 현상을 이용할 경우 주행 항력의 대부분을 차지하는 마찰저항을 최소화할 수 있어 초고속 주행이라는 효과를 얻을 수 있다^[1-4]. 최근 선진국들은 중심으로 관련 기술이 재조명되고 있으며, 초공동 수중운동체는 러시아와 독일에서 개발되었고 미국과 중국에서도 개발 중인 것으로 알려져 있다. 예를 들어 1960년대 구소련에서 개발된 초공동 어뢰 VA-111 Shkval은 1977년경부터 운용되고 있다. 미국의 Juliet Marine Systems社は 초공동 발생 수중 추진부를 이용한 GHOST 초공동 함정을 비롯하여 초공동 잠수함의 개발을 계획하고 있으며, 노르웨이 DSG社は 초공동 현상을 이용한 탄약을 개발하였다.

기존에는 초공동 수중운동체의 추진시스템과 유체역학적 연구^[5-8]에 초점이 맞춰져 있었다면, 최근에는 초고속에서의 안정성과 주행성을 분석하기 위한 동역학 모델링 및 제어 연구가 활발히 이루어지고 있다^[1-4]. Kim & Kim^[1-3]은 종방향의 개루프 성능 분석 및 종방향에서의 자세제어와 심도제어 및 운항영역 보호에 관한 연구결과를 제시하였다. 참고문헌^[4]는 횡방향에서의 개루프 성능에 관한 연구결과를 제시하였으나 직진제어를 위한 횡축/방향축 페루프 제어에 관한 성능을 제시하지 않았다. 이러한 배경으로 고속 상태에서의 횡방향과 방향축 특성을 고려한 직진 및 심도 제어에 관한 연구는 미비한 실정이며, 조종면으로 활용 가능한 전방의 캐비테이터와 후방의 엘리베이터/러더를 어떠한 조합으로 활용할 것인가에 대한 분석이 필요하다.

종방향의 경우 피치각 및 심도제어를 위하여 캐비테이터와 엘리베이터의 동시 활용이 가능하며, 직진성능 향상을 위하여 후방의 러더를 이용한 방향축 제어를 고려할 수 있다. 특히, 후방에 장착되는 좌우 엘리베이터 핀은 종방향 제어를 위하여 동기화된 운용이 가능할 뿐 아니라, 좌우 엘리베이터를 항공기의 에일러론과 유사하게 차등 조종면(differential control surface)으로 활용하여 횡방향 제어에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 다양한 조종면 조합에 따른 초공동 수중운동체의 심도 및 직진 제어의 성능을 분석하였으며, 수치 시뮬레이션을 통하여 공동이 형성되는 초기의 불안정한 구간에서 조종면 조합을 통한 횡축과 방향축 제어를 통해 직진성능이 향상될 수 있음을 확인하였다.

2장에서는 초공동 수중운동체의 6자유도 모델링을 이용한 시뮬레이션 환경 구축을 기술하였고, 3장에서는 직진주행 및 심도 제어를 위한 제어법칙 설계를 기술하였다. 또한, 4장에서는 수치 시뮬레이션을 통한 안정성 및 조종면 조합에 따른 주행성능을 분석하였고 5장에서는 결론 순으로 나열하였다.

2. 초공동 수중운동체 동역학 모델링

2.1 6자유도 동역학 모델링

초공동 수중운동체의 형상은 Fig. 1과 같고 동역학 모델링은 MATLAB/Simulink 환경에서 수행되며, 동역학 모델은 공동, 캐비테이터, 핀, 유체력 모델링 등으로 구성된다.

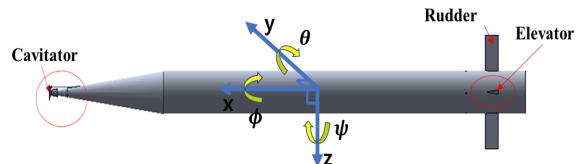


Fig. 1. Supercavitating underwater vehicle

수중운동체의 6자유도 운동방정식은 식 (1)과 (2)로 표현되며, 작용하는 힘과 모멘트는 캐비테이터, 핀, 유체력 등으로 나누어 고려된다.

$$M \begin{bmatrix} \dot{u} + qw - vr \\ \dot{v} + ur - pw \\ \dot{w} + pv - uq \end{bmatrix} = F_{Thrust} + F_{Cavitator} + F_{Fins} + F_{Gravity} + F_{Wet} + F_{planing} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_x \dot{p} + qr(I_z - I_y) \\ I_y \dot{q} + pr(I_x - I_z) \\ I_z \dot{r} + pq(I_y - I_x) \end{bmatrix} = M_{Thrust} + M_{Cavitator} + M_{Fins} + M_{Wet} + M_{planing} \quad (2)$$

여기서, $()_{Thrust}$, $()_{Cavitator}$, $()_{Fins}$, $()_{Gravity}$, $()_{Wet}$, $()_{planing}$ 는 각각 추력, 캐비테이터, 핀, 중력, 유체력 및 플레잉에 의한 힘과 모멘트를 의미한다.

또한, 오일러각을 계산하기 위한 수중운동체의 운동역학 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \sin\phi \tan\theta \cos\phi \tan\theta & p \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & q \\ 0 \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta & r \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 공동 모델링

공동 모델링에서 중요한 파라미터는 공동수(σ_c)이며 일반적으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_c = \frac{p_\infty - p_c}{0.5\rho V^2} \quad (4)$$

여기서 p_∞ 와 p_c 는 동일 수심에서 갖는 유체의 정압과 공동 내 압력이다. 본 연구에서는 캐비테이터 부근에 gas와 공기를 인위적으로 주입하여 공동을 형성하였고, 비교적 저속에서도 신속하게 공동이 형성되는 환기 공동 모델을 도입한다. 공동의 형상을 결정하기 위해 Garabedian^[7]과 May^[8]의 공동 형상 식을 이용하였고 초기 공동 수에서 시뮬레이션을 시작하여 목표 공동 수에 수렴되도록 환기 공동의 가스공급이 이루어진다고 가정하였다. 공동의 길이와 최대 반경은 식 (5)-(6)를 통해 계산되며, 이를 이용한 최종 공동 프로파일은 식 (10)을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{L_c}{2R_n} = \frac{1}{\sigma} \sqrt{C_D \ln \frac{1}{\sigma}} \quad (5)$$

$$\frac{R_{\max}}{R_n} = \sqrt{\frac{C_D}{\sigma}} \quad (6)$$

$$R_c(x) = R_{\max} \left(1 - \left(\frac{x - L_c/2}{L_c/2}\right)\right)^{1/2.4} \quad (7)$$

여기에서 R_c 은 캐비테이터 궤적에 수직인 방향으로 형성된 공동의 반지름이다.

2.3 캐비테이터/핀 모델링

캐비테이터는 디스크의 형태를 가지며 피치 축으로만 회전하는 1자유도 운동을 한다. 물과의 접촉으로 인한 항력 및 양력을 발생시키며, 이를 활용해 공동을 형성함과 동시에 수중운동체를 제어한다. 본 연구에서는 캐비테이터에 의한 항력계수는 Kirschner^[9]에 의한 실험값 등을 참고하며, 캐비테이터에 의한 양항력 식

과 최종 힘과 모멘트는 Kim & Kim^[1-4]을 참고하였다.

Fig. 1과 같이 핀은 수중 운동체의 후면에 위치하며 2개의 수평 핀은 엘리베이터, 2개의 수직 핀은 러더라고 칭한다. 핀에 의한 힘과 모멘트 식과 계수는 Kirschner^[9]의 실험값에 보간법을 이용하였으며, 핀에 작용하는 힘과 모멘트는 핀의 받음각 α_f 와 액침 깊이 d_f 에 따라 결정된다. 자세한 관련 식은 Kim & Kim^[1-4]을 참고할 수 있다. 각 핀에서 동체축을 기준으로 회전 행렬을 이용하면 핀에 의한 동체의 무게중심에 작용하는 힘과 모멘트를 구할 수 있다. 여기서, 핀 좌표계의 중심은 핀에 작용하는 유체력의 압력 중심에 위치하므로 핀 좌표계의 중심은 핀의 액침 깊이에 따라 변화한다. 즉, 핀의 액침은 공동의 중심과 반지름 및 동체의 중심만을 이용하여 실시간으로 구해진다.

2.4 유체력 모델링

초공동 수중운동체는 천이 영역에서의 부분 공동 하에서나 공동이 완성한 이후에도 유체력의 영향을 받는데 이는 공동중심축 변화에 의해서 일부 동체와 핀에서 물과의 접촉이 일어나기 때문이다. 동체의 액침 부위에 작용하는 유체력은 부력에 의한 힘과 모멘트, 압력저항 및 마찰저항, 부가질량에 의한 영향 등이 있으며, 이에 대한 자세한 식은 Kim & Kim^[1-4]을 참고하기 바란다.

2.5 공동 중심축 변화를 고려한 액침 추정

공동면이 생성된 뒤 시간이 지남에 따라 공동 중심축은 주변 흐름의 교란 또는 중력의 영향에 따라 변화한다. 본 논문에서는 캐비테이터 받음각과 중력의 영향을 모델링함으로써 공동 중심축에 영향을 주는 요인을 고려한다^[1-4]. Fig. 2와 같이 액침은 공동 중심축이 중력이나 캐비테이터 받음각에 의해 변화할 경우 Y와 Z축에 비대칭이 되기 때문에 핀의 힘과 모멘트, 부력, 마찰력, Morison 힘을 계산하는 데 영향을 끼친다.

Savchenko^[5]와 Logvinovich^[6]는 한정된 공동 수와 Froude 수 조건에서 이를 경험적으로 표현하였으며, Fig. 3은 공동 수에 따른 공동의 중심축 변화를 속도 80 m/s에서 비교했다. 본 논문에서는 최종적으로 Logvinovich^[6]을 활용했으며, 공동수가 0.1을 이하로 내려가는 경우 두 모델의 차이가 벌어지는 것을 확인했다.

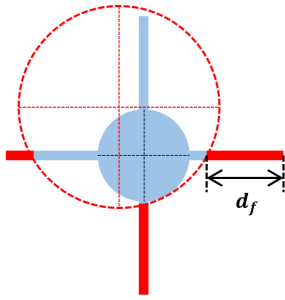


Fig. 2. Fin's liquid immersion

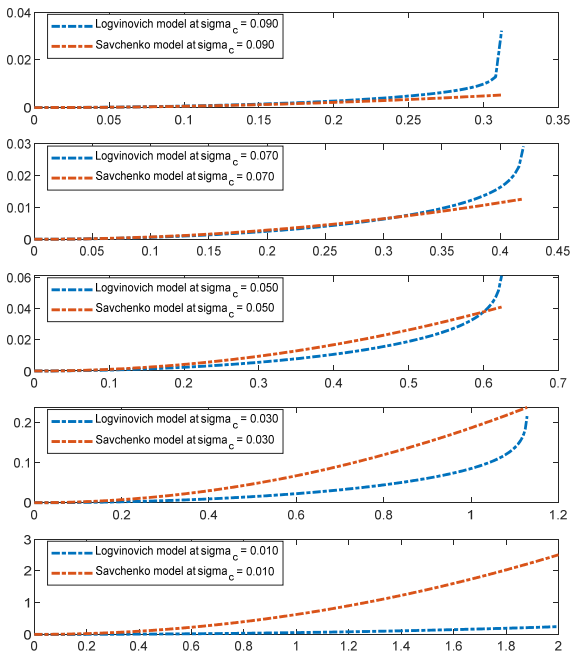


Fig. 3. Changes in the central axis of the cavity due to the number of cavities and gravity

2.6 플레이닝 모델링

플레이닝은 수중운동체가 초공동 주행 시 동체의 뒷부분이 공동 벽에 충돌할 때 발생한다. Dzielski^[10]는 플레이닝 침수 깊이와 운동체 후미와 공동면 사이의 각에 의해 플레이닝 힘을 정의한 바 있다. 본 논문에서는 Dzielski^[10]의 수식을 적용했을 때 예상 이상으로 큰 플레이닝이 예측되어 Yen^[11]이 제안한 경험식을 적용했다. 플레이닝에 의한 양력계수는 식 (8)과 같으며, 이는 플레이닝 영역에서 힘과 모멘트를 계산하는데 사용된다.

$$C_{L,planing} = \alpha^{1.54} \left(0.9\lambda^{0.64} + \frac{0.3\lambda^{2.9}}{Fr^2} \right) \tag{8}$$

여기서 $Fr = \frac{v}{\sqrt{2gR_{veh}}}$ 이며, 무차원화 된 Keel의 침수 길이 λ 는 $\frac{h_0}{2R_{veh}\alpha}$ 와 같다. 플레이닝에 의한 유체력은 그 크기를 정확히 예측하기 어려운 분야로, 현재도 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 플레이닝 모델링의 정확성을 검증할 필요가 있으며 향후 추가적인 보완이 필요하다고 판단된다.

2.7 추력과 중력 모델링

추력은 무게중심에서 동체축 기준 기수 방향으로만 작용하기 때문에 무게중심 주위의 모멘트는 없으며, 본 연구에서는 식 (9)와 같이 일정한 트림 추력이 적용되는 것으로 가정하였다.

$$F_{thrust} = \begin{bmatrix} F_{thrust_{trim}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

중력은 무게중심에서 작용하여 식 (10)과 같이 피치 각 및 롤 각에 따라 동체축을 기준으로 변환할 수 있으며 중력에 의한 모멘트 영향 무시한다.

$$F_{gravity} = \begin{bmatrix} -mgsin\theta \\ mgcos\theta sin\phi \\ mgcos\theta cos\phi \end{bmatrix} \tag{10}$$

2.8 구동기 모델링

조종면의 구동기는 1차 전달함수로 설계하였으며 식 (11)과 같고, 라플라스 역변환을 수행하면 식 (12)와 같이 설계할 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{11}$$

$$y_n = \frac{\tau}{\tau + t_s} y_{n-1} + \frac{t_s}{\tau + t_s} x_n \tag{12}$$

여기서, τ 는 시상수를 의미하며 x_n 은 입력이고, y_n 은 구동기를 거쳐 나오는 출력이다. 시상수는 0.2로 설계하였다.

3. 자세 및 심도 제어

3.1 초공동 수중운동체의 제어 시스템

수중운동체 조종은 캐비테이터와 핀을 통해 수행되며, 특히 핀은 엘리베이터와 러더 각각 1쌍으로 구성되어 있다. 캐비테이터는 동체 앞에서 가장 큰 양력과 항력을 발생시키며 질량중심에 대한 모멘트 암이 핀보다 상대적으로 크기 때문에 종방향 제어에 주도적인 역할을 한다. 후방 엘리베이터는 캐비테이터와 함께 피치각 제어를 수행할 뿐만 아니라 횡방향 제어를 위한 차동 조종면의 역할을 수행하는 것이 가능하다. 러더는 요 방향 안정화를 위해서 사용될 수 있으며 특히 초기 공동이 형성될 때 효과적인 안정성 증대 시스템으로써 사용될 수 있다. 심도 및 자세제어의 전체 블록선도는 Fig. 4와 같다.

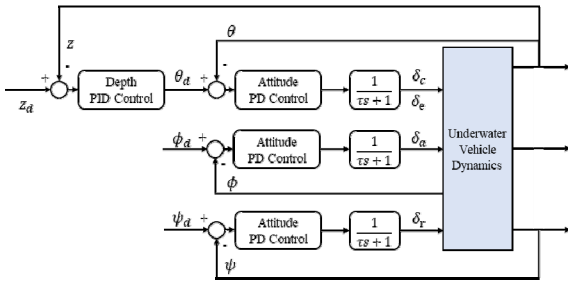


Fig. 4. Hierarchical controller structure for controlling attitude and depth of underwater vehicle

3.2 심도(z) 제어

심도 제어기는 PID 제어기로 구성된 외부루프이며 심도를 추종하는 피치각 자세 명령을 생성한다. 외부루프는 심도 오차 \tilde{z} 를 피치각 명령으로 변환하는 전달함수로서 가능하며, 피치각의 최종명령은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\tilde{z} = z_d - z \quad (13)$$

$$\theta_d = K_{P,z}\tilde{z} + K_{I,z}\int_0^T \tilde{z}(t)dt + K_{D,z}\dot{\tilde{z}} \quad (14)$$

3.3 피치각(θ) 자세제어

피치각 제어를 위하여 캐비테이터 및 엘리베이터가 사용되며, 캐비테이터를 단독으로 사용할 수도 있고

엘리베이터와 병행하여 사용될 수도 있다. 피치각 명령은 심도 제어기를 통해 이중 루프 구조로 전달된다. 자세제어는 피치각을 제어하고 PD 제어기로 된 내부루프를 이용한다. 피치각 오차 및 내부루프의 제어기 최종 출력은 식 (15) 및 (16)과 같다.

$$\tilde{\theta} = \theta_d - \theta \quad (15)$$

$$\begin{aligned} K_{P,\theta,\delta_c}\tilde{\theta} + K_{D,\theta,\delta_c}\dot{\tilde{\theta}} &= \delta_c \\ K_{P,\theta,\delta_e}\tilde{\theta} + K_{D,\theta,\delta_e}\dot{\tilde{\theta}} &= \delta_e \end{aligned} \quad (16)$$

3.4 요각(ψ) 자세제어

1쌍의 러더가 요각 제어를 위해 사용될 수 있으며, 요각 명령은 직진주행을 위하여 0으로 설정된다. 자세제어는 요각을 제어하고 PD 제어기로 이루어진 내부루프를 사용한다. 요각 오차 및 내부루프 제어기 최종 출력은 식 (17) 및 (18)과 같다.

$$\tilde{\psi} = \psi_d - \psi \quad (17)$$

$$K_{P,\psi}\tilde{\psi} + K_{D,\psi}\dot{\tilde{\psi}} = \delta_r \quad (18)$$

3.5 롤각(ϕ) 자세제어

1쌍의 엘리베이터는 롤각 제어를 위한 차동 조종면(differential)으로써 사용될 수 있으며, 직진주행을 위하여 롤각 명령은 0으로 설정한다. 자세제어에서는 롤각을 제어하며, PD 제어기로 구성된 내부루프를 사용한다. 롤각 오차와 내부루프의 제어기 최종출력은 식 (19) 및 (20)과 같다.

$$\tilde{\phi} = \phi_d - \phi \quad (19)$$

$$K_{P,\phi}\tilde{\phi} + K_{D,\phi}\dot{\tilde{\phi}} = \delta_a \quad (20)$$

Table 1. Control gains

	비레이득	미분이득	적분이득
심도추종	-0.32	-0.1	-0.01
피치자세	-0.30	-0.06	-
롤자세	0.015	0.0015	-
요자세	0.15	0.06	-

3.6 제어이득

심도추종 위치제어기 및 각 축의 자세제어기에 사용되는 제어이득은 시행착오를 통한 세부조정을 거쳐 설계 되었으며 이를 Table 1에 제시하였다.

4. 수치 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

초공동 수중운동체의 시뮬레이션 환경은 Fig. 5와 같다. 공동 수에 따른 공동의 형성이 계산되고, 이를 이용하여 공동에 의한 동체의 액침이 결정된다. 이를 기반으로 외부 힘과 모멘트(추력, 중력, 캐비테이터, 핀, 유체력, 플레잉 등)가 계산되고, 6자유도 운동방정식을 통해 동체축에서의 속도와 회전각속도가 결정된다. 운동 역학식을 이용하여 오일러각으로 표현된 3축의 자세와 NED 좌표계에서의 수중운동체 위치를 최종결정하게 된다.

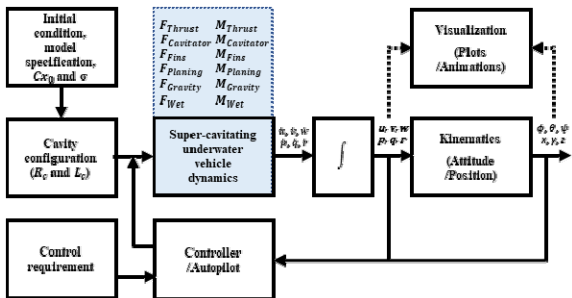


Fig. 5. Flow chart of simulation environment

Table 2. Input and initial value

제 원	값
Thrust force (T)	10,000 N
Initial depth (z_0)	5 m
Initial forward velocity (u_0)	10 m/s
Initial attitude (ϕ_0, θ_0, ψ_0)	0 deg
Initial angular velocity (p_0, q_0, r_0)	0 deg/s
Initial 2D position (x_{North_0}, y_{East_0})	(0 m, 0 m)

시간 영역에서의 적분을 통하여 동체축 3축 속도, 3축 자세 각속도, 3축 오일러 자세각, 3축 위치로 구성된 12개의 상태변수가 결정되고, 이 중 일부를 피드백

신호로 이용하여 제어를 설계하였다. 시뮬레이션에서 사용한 입력값과 초기값은 Table 2와 같다.

구동기의 시상수는 0.2로 설정하였으며, 0.7 이상의 경우 제어성능이 현격히 낮아짐을 확인하였다. 더불어 캐비테이터의 입력에는 $\pm 3^\circ$, 러더 및 엘리베이터에는 각각 $\pm 10^\circ$ 의 구동기 포화를 설정하였다.

4.2 개루프 직진 성능 분석

먼저 어떠한 조종면도 사용하지 않고, 초기 조건에서 10,000N의 고정된 추력만을 가하여 직진성능을 분석했다. 동체 길이를 모두 덮는 공동이 1초 이내에 생성되었으며 이로 인해 부력과 유체력이 급격히 감소하였고, 이후 Fig. 6과 같이 중력에 의해 침강하는 궤적이 형성되었다.

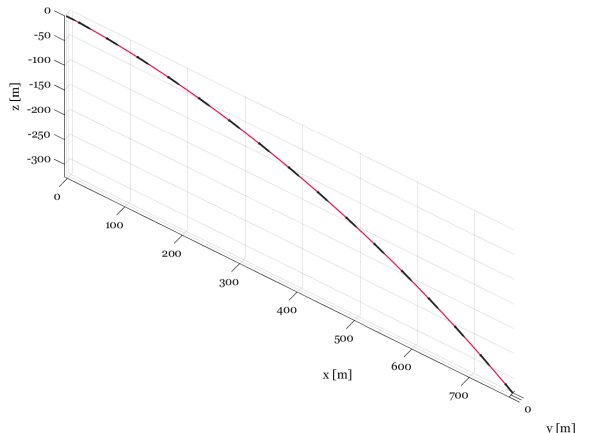


Fig. 6. 3D trajectory: open-loop simulation

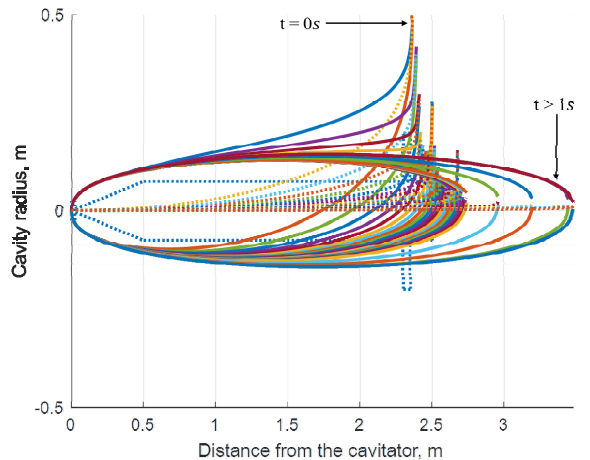


Fig. 7. Variation of cavity shape over time

Fig. 7은 시간이 지남에 따른 공동의 형상을 나타낸다. 초기에 저속의 높은 공동수에서는 부력에 의한 공동 중심축의 상승이 크게 발생하게 되고, 시간이 지남에 따라 고속에서는 안정된 공동이 형성된다. 이러한 비대칭 공동 형성은 핀과 플레이닝에 영향을 주어 불안정한 힘과 모멘트를 발생시킨다.

4.3 페루프 직진성능 분석(심도 고정)

캐비테이터만을 이용한 경우를 시작으로 엘리베이터와 러더, 차등 조종면을 추가 활용하여 총 네 가지의 조종면 조합을 구상하였으며 결과는 다음과 같다.

4.3.1 Case 1: 캐비테이터만을 이용한 경우

고전제어 기반의 이중 루프 구조를 적용하여 캐비테이터만을 이용한 천이 구간 제어 및 심도 제어 수행하였으며, 수중운동체가 천이 구간 및 초공동 상태를 지나 정상상태에 도달한 후 일정한 트림 값을 가짐을 확인하였다. 심도 오차가 RMSE 기준 약 0.21 m로 준수한 성능을 보였으나 좌측 롤과 선회 모멘트가 발생하였고, 좌측 롤각과 헤딩각 드리프트(Fig. 10)로 인해 최종으로 Fig. 8과 Fig. 9에서 같이 좌측으로 약 22 m 밀려났다. Fig. 11을 보면, 공동이 형성되는 초기에 Planing에 의한 z축 힘이 지배적으로 발생하고, 이후에는 액침된 핀의 힘과 모멘트가 커지게 된다. 초기에 공동이 형성되면서 러더의 상하 액침깊이가 달라지면서 종방향 뿐 아니라 횡방향과 방향축 모멘트가 형성되고 이에 따라 자세변화가 생기면서 캐비테이터나 플레이닝과 같은 다른 요인에 의한 외력과 모멘트가 발생하게 된다. Fig. 11에서 Wetted로 표현된 유체력은 부력, 마찰력, Morrison 힘으로 구성되는데, 공동이 형성됨에 따라 부력중심이 뒤로 이동하게 되고, 초기에 양의 피치각을 가질 경우 부력이 양의 x방향 힘을 가지게 된다. 이를 제어하기 위하여 초기 시간에 캐비테이터가 구동되는 것을 Fig. 12에서 확인할

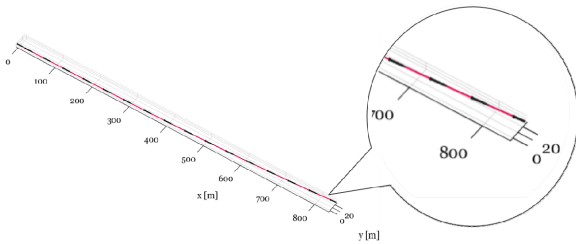


Fig. 8. 3D trajectory(Case 1)

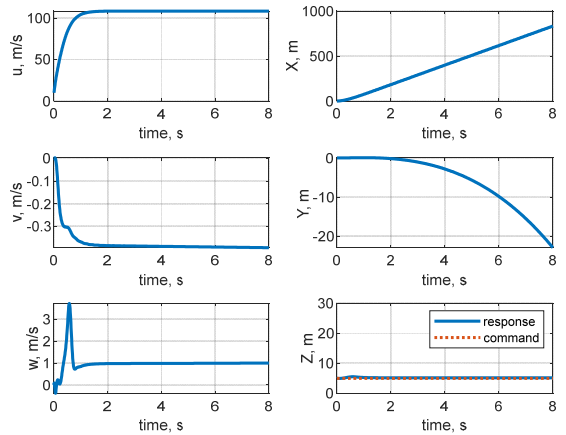


Fig. 9. Body-axis velocity & position(Case 1)

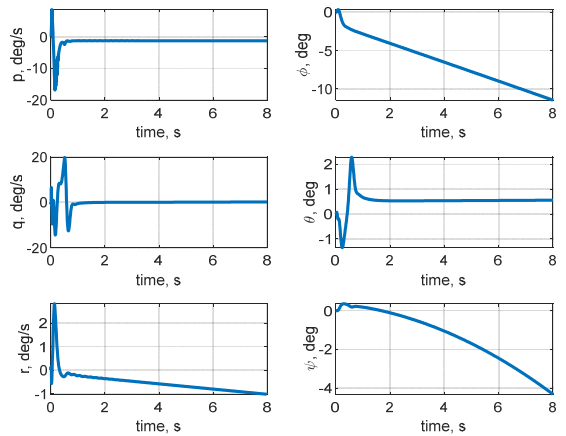


Fig. 10. Angular rate & attitude(Case 1)

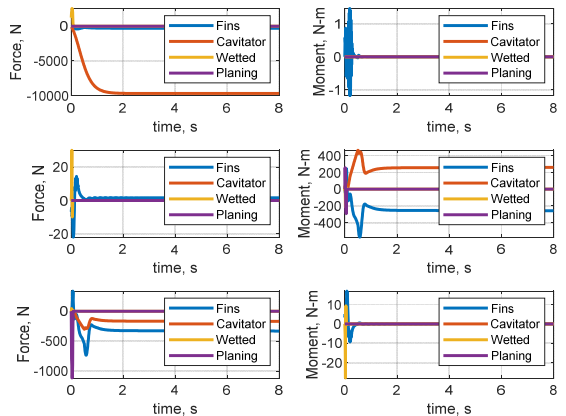


Fig. 11. External forces & moments in x,y, & z axes from the top(Case 1)

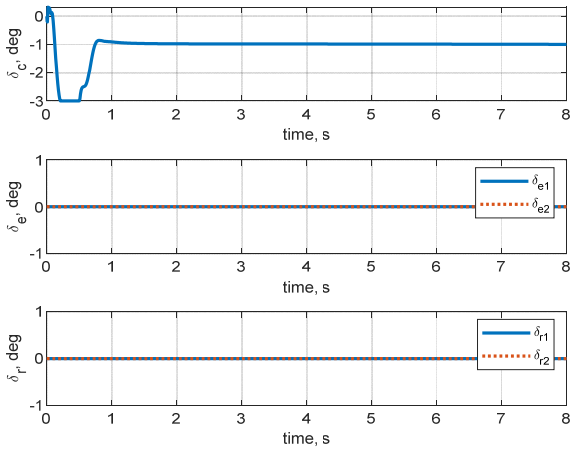


Fig. 12. Control surface deflections(Case 1)

수 있다. 결과적으로, 방향축 및 횡축을 제어하지 않으면 직진성능이 수십 초 안에 수십 미터를 밀려날 정도로 저하됨을 확인하였고, 이는 곧 러더와 엘리베이터를 이용한 방향축 및 횡축 제어의 필요성을 시사한다.

4.3.2 Case 2: 캐비테이터/엘리베이터 동시 적용

4.1.1 항의 캐비테이터만을 이용한 경우와 비교하여 RMSE로 본 심도 제어성능은 거의 동일한 수준이며, RMSE 기준 직진성능은 약 58 % 향상되었다. Fig. 13의 y축 위치 반응을 보면 8초 동안 약 9미터 좌측으로 밀려나는 것을 볼 수 있다. Fig. 16과 같은 엘리베이터에서 발생하는 종방향 제어력이 초기 캐비테이터의 변

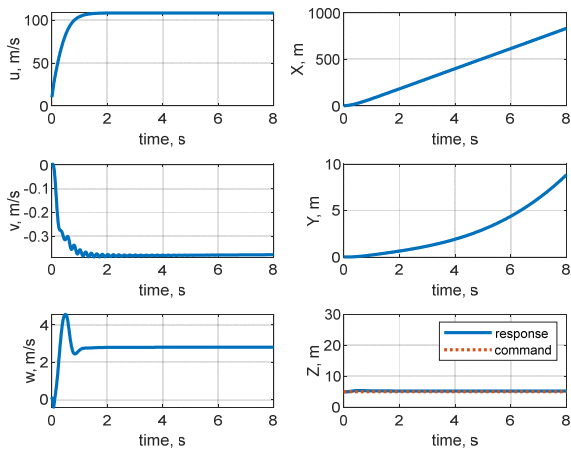


Fig. 13. Body-axis velocity & position(Case 2)

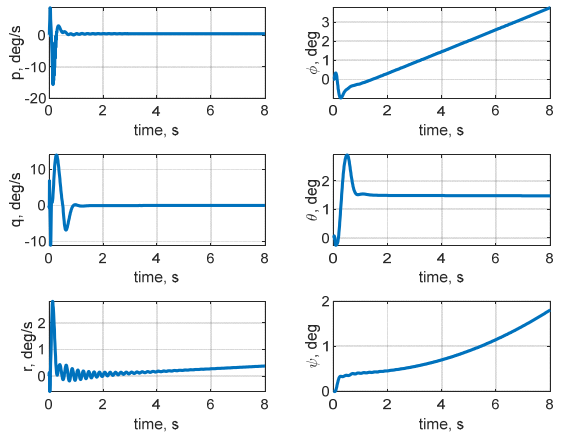


Fig. 14. Angular rate & attitude(Case 2)

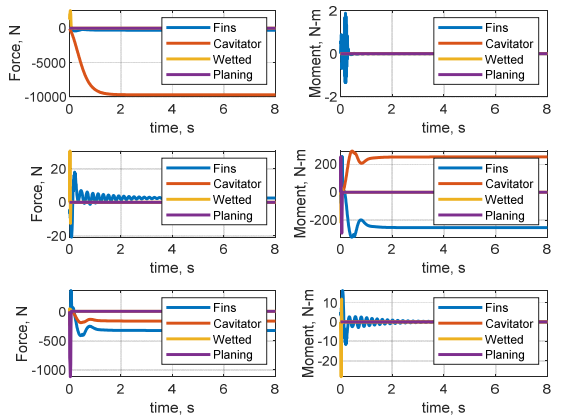


Fig. 15. External forces & moments in x,y, & z axes from the top(Case 2)

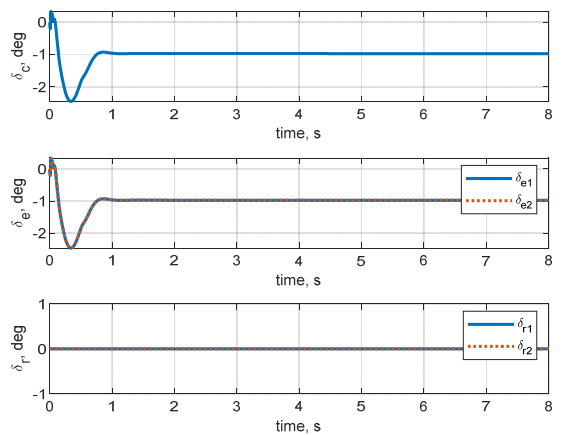


Fig. 16. Control surface deflections(Case 2)

위 요구도를 감소시키는 효과를 발생시켰고, 이로 인해 공동이 형성되는 초기의 직진성능이 향상되었다. 그러나 Fig. 14~15에서 볼 수 있듯이 엘리베이터의 겸용으로 인해 초기에 방향축 힘과 모멘트에 의한 진동이 많이 발생하게 되었고, 이로 인해 방향축 각속도와 측면 속도에 진동이 발생하였다. Fig. 14의 롤각과 헤딩각을 보면 시간에 따라 흐르는 것을 살펴볼 수 있다.

4.3.3 Case 3: 캐비테이터+엘리베이터+방향축 러더 안정화

4.1.2 항에서 기술한 바와 같이 캐비테이터와 엘리베이터를 동시에 사용하는 경우 방향축 진동 발생하므로 진동 감소를 위해 항공기에 흔히 적용되는 요

댐퍼(yaw damper)를 응용하여 설계하였다. 이는 요각의 안정성 증대를 위하여 요각속도를 피드백하는 것을 뜻한다. 그 결과 4.1.2 항보다 RMSE 성능으로 약 22 %의 직진성능이 향상되었으며, 4.1.1 항과 비교하면 약 68 %가 향상되었다. Fig. 17의 심도유지 성능과 y축 변위 반응을 통해 직진성능 확인이 가능하다. 특히 요 댐퍼의 사용(Fig. 20의 러더변위)으로 초기에 방향축 힘과 모멘트(Fig. 19의 z축 반응)로 인한 핀의 진동이 감소하였고, 이로 인해 방향축 각속도와 측면 속도에 진동이 감소하였다는 것을 Fig. 18에서 확인할 수 있다. 그러나 여전히 롤축의 초기 진동이 남아있고, 롤각 반응이 흐르는 것을 볼 수 있다. 이는 엘리베이터를 차등 조종면으로 사용할 필요성을 시사한다.

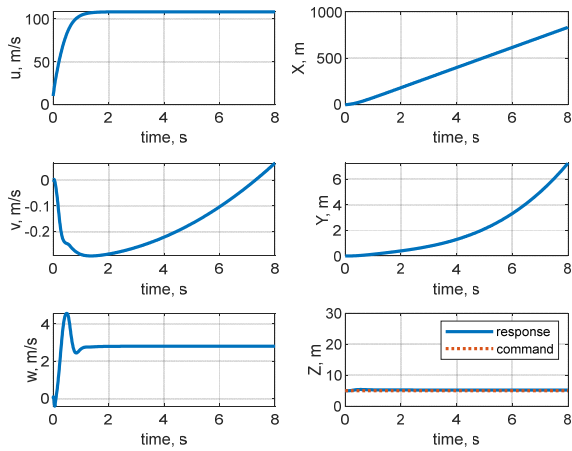


Fig. 17. Body-axis velocity & position(Case 3)

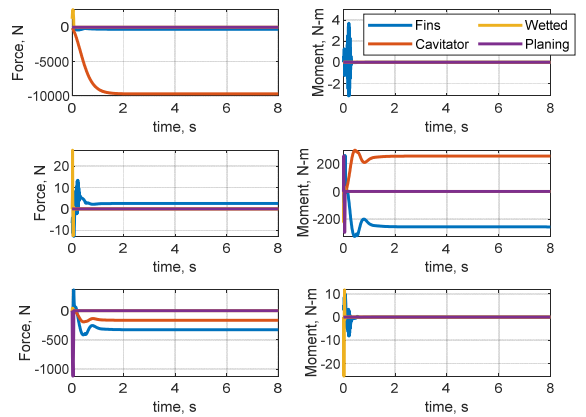


Fig. 19. External forces & moments in x,y, & z axes from the top(Case 3)

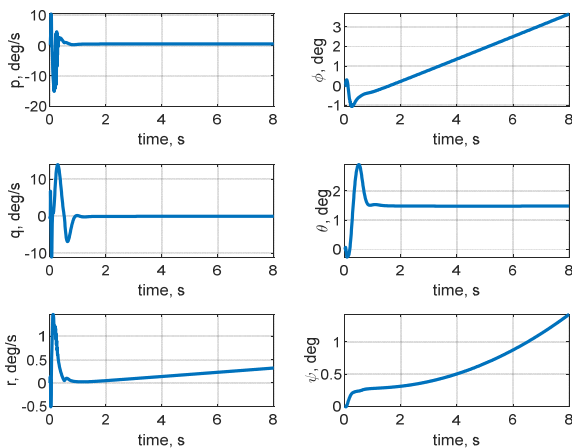


Fig. 18. Angular rate & attitude(Case 3)

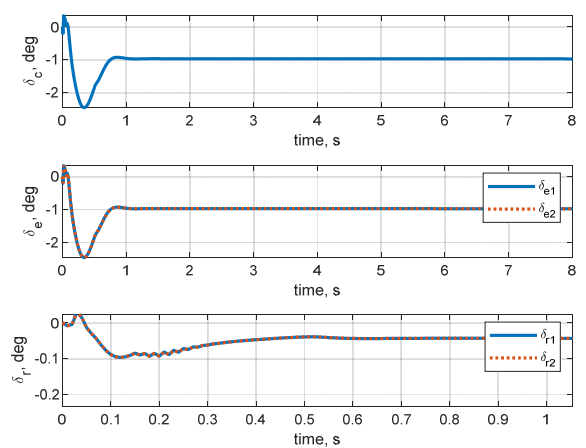


Fig. 20. Control surface deflections(Case 3)

4.3.4 Case 4: 캐비테이터+엘리베이터+방향족 러 더 안정화+횡방향 차등 조종면 안정화

마지막으로 롤 축의 안정성 증대 및 직진성능 향상을 위하여 엘리베이터를 differential 조종면(좌우 엘리베이터를 반대로 운용)으로 활용하였다. Fig. 21의 3차원 궤적을 보면 직진성능이 향상되는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 22의 y축 위치반응을 보면 8초간 약 4미터 수준에서 직진성능을 유지하고 있다. Fig. 23의 자세각속도와 자세각 반응에서도 이전 경우보다 안정화되었으며, 롤각과 헤딩각은 1도 정도의 수준에서 제어되고 있다. Fig. 25의 조종면 변위를 보면 차등조종면의 값은 다른 조종면의 변위보다 상대적으로 작지만 초기 시간에서의 롤각 흐름을 통제하면서 전체적인 직진성능에 기여하였다. Fig. 24는 해당시간 동안 차등조종면 동작으로 인해 Fin에 의한 모멘트가 다른 case들보다 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 26은 엘리베이터에 대한 차등조종면 값을 별도로 보여주고 있으며, 초기 시간에 기민하게 동작하여 롤각을 제어하고, 초기 시간 이후에도 일정한 트림값으로 수렴하여 롤각이 흐르는 현상을 효과적으로 통제하고 있다.

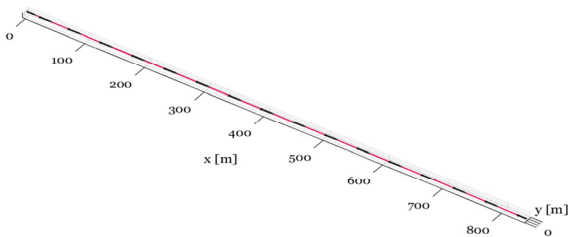


Fig. 21. 3D trajectory: control surface combination

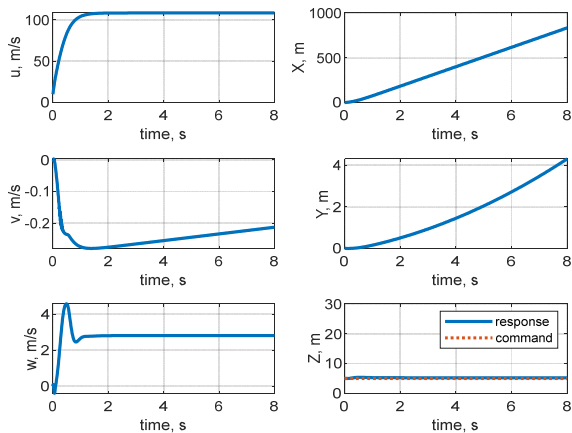


Fig. 22. Body-axis velocity & position(Case 4)

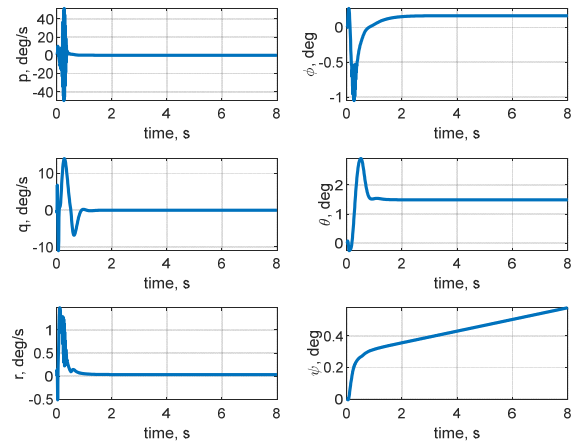


Fig. 23. Angular rate & attitude(Case 4)

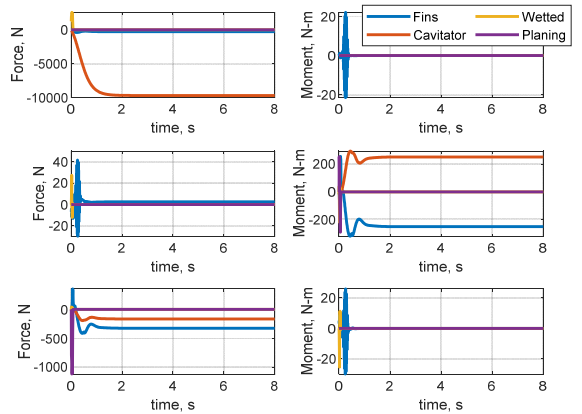


Fig. 24. External forces & moments in x,y, & z axes from the top(Case 4)

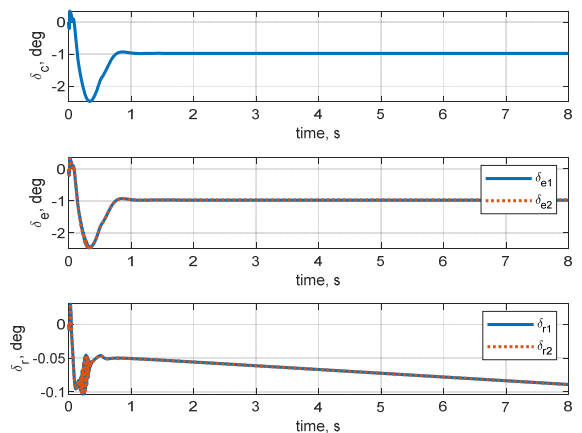


Fig. 25. Control surface deflections(Case 4)

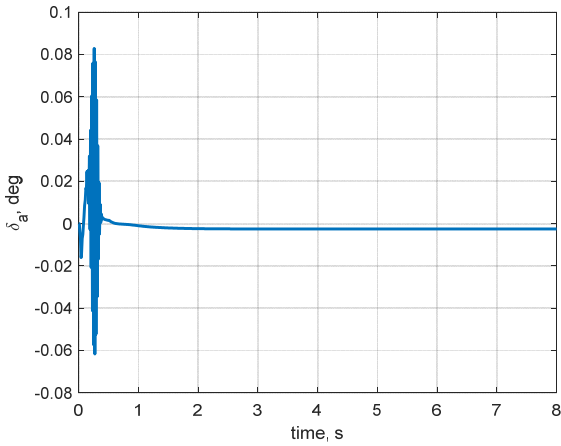


Fig. 26. differential deflection command(Case 4)

심도 및 직진성능을 분석하기 위해 4가지 조합에 대한 심도추종 오차와 직진성능 오차를 Table 3에 요약했다. 심도추종의 경우 네 경우가 큰 차이가 없으나, 직진성능의 경우 캐비테이터만을 사용하는 경우보다 러더와 차등 조종면을 혼용한 경우가 우수함을 확인했다. 특히 차등조종 개념을 엘리베이터에 적용할 경우 러더를 도입한 경우보다 더 큰 개선효과를 얻을 수 있는 것을 캐비테이터만을 사용한 경우 대비 개선율(%)를 증가율을 보면 알 수 있다.

Fig. 12를 보면 캐비테이터만을 사용할 경우 초반부 0.3초 정도의 시간동안 포화되며, 이후 다른 조종면을 조합할 경우에는 포화되지 않는 것을 확인할 수 있다. 캐비테이터는 초기 공동생성에도 중요하게 관여하고 있기 때문에 조종력을 심하게 사용할 경우 시스템의 진동특성이 안 좋아지고 매우 빠른 시간에 불안정하게 만드는 특성을 가지고 있다. 실제 운용 시에는 초공동 수중운동체의 속도 특성에 따라 포화 정도를 조절해야 할 필요성이 있다.

Table 3. Control performance analysis

	4.1.1	4.1.2	4.1.3	4.1.4
심도추종 RMSE(m)	0.21	0.23	0.23	0.23
심도추종 최대오차(m)	0.54	0.39	0.39	0.39
직진성능 RMSE(m)	8.77	3.69	2.89	2.10
4.1.1 대비 개선율	-	58 %	68 %	77 %
직진성능 최대오차(m)	22.99	8.88	7.30	4.30
4.1.1 대비 개선율	-	62 %	69 %	82 %

4.4 페루프 가변 심도 명령 추종 성능 분석

본 연구에서 제안된 조종면 조합의 가변 심도 명령의 추종 성능을 파악하기 위하여 4초 전에는 5 m의 명령, 이후에는 2 m의 명령을 인가하였으며, 조종면을 모두 혼용하여 적용할 경우 4초에 가변고도 명령이 인가되고, 안정적으로 심도 2 m에 수렴하는 것을 Fig. 27과 Fig. 28에서 확인할 수 있다. Fig. 29는 자세각속도와 자세각을 보여주며, 가변 고도를 추종하기 위하여 4초에 피치각 변화가 발생되고 커플링으로 인한 다른 축에서의 운동도 관찰된다. 물론 차등조종면으로 인해 0도 근처에서 유지되고 있으며, heading 각 또한 러더에 의해 1도 이내에서 제어되고 있다. Fig. 30은 4초의 가변고도 추종을 위한 외력과 외부모멘트의 급격한 변화를 보여주고 있으며, Fig. 31-32는 공동형성 초기와 가변고도 추종 시의 차등조종면의 기민한 명령을 보여준다.

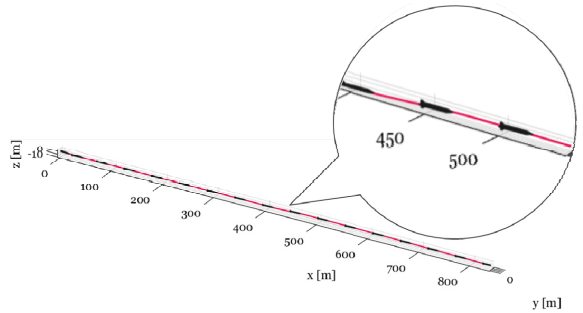


Fig. 27. 3D trajectory: depth change maneuver

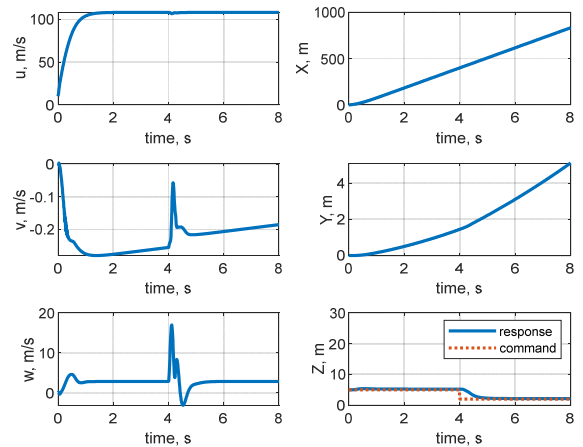


Fig. 28. Body-axis velocity & position(depth tracking with control surface combination)

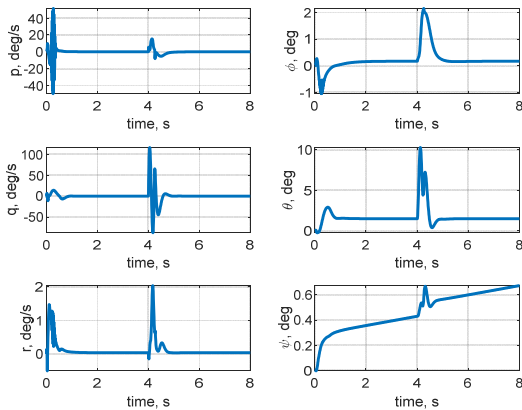


Fig. 29. Angular rate & attitude(depth tracking with control surface combination)

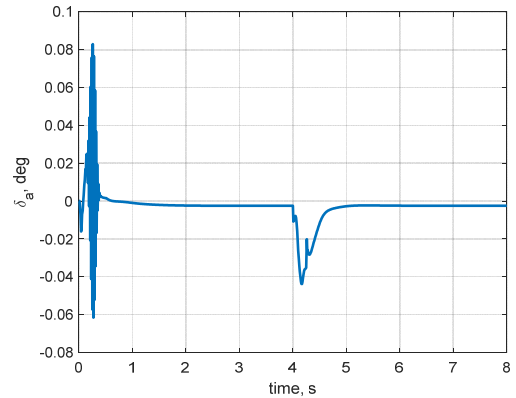


Fig. 32. differential deflection command(depth tracking with control surface combination)

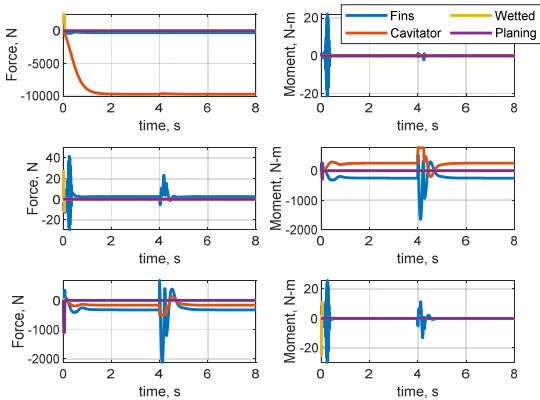


Fig. 30. External forces & moments(depth tracking with control surface combination)

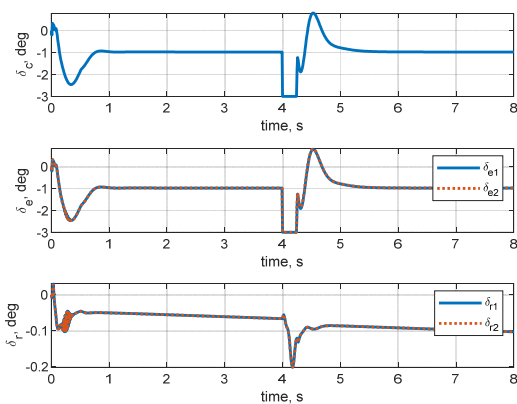


Fig. 31. Control surface deflections(depth tracking with control surface combination)

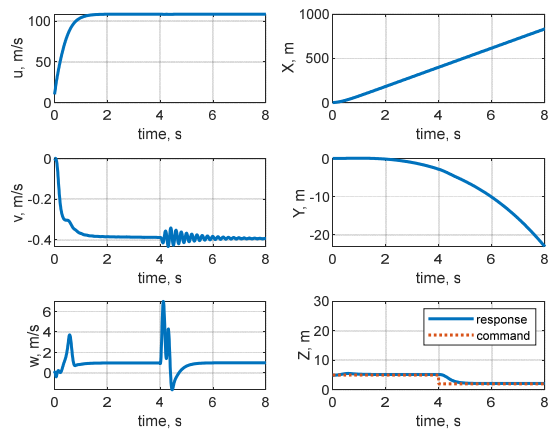


Fig. 33. Body-axis velocity & position(depth tracking with cavitator only)

Fig. 33~36은 캐비테이터만을 적용한 가변 고도추종 결과를 보여주고 있다. Fig. 33의 관성좌표계 위치 및 동체축 속도와 Fig. 34의 자세반응과 Fig. 35의 외력과 모멘트를 보면, 캐비테이터만 사용한 경우 가변고도가 인가된 후의 반응이 상당히 불안정하고 진동이 많은 것을 볼 수 있다. 특히 Y축 위치 그래프를 보면, 4.3절에서 논의한 바와 같이 방향축 및 횡축을 제어하지 않으면 직진성능이 약 20 m 이상 밀려날 정도로 저하됨을 확인할 수 있다.

결과적으로 본 연구를 통해서 설계된 다중 조종면 조합을 통한 PID 다중루프 제어구조가 가변 심도 명령을 추종하는 데도 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

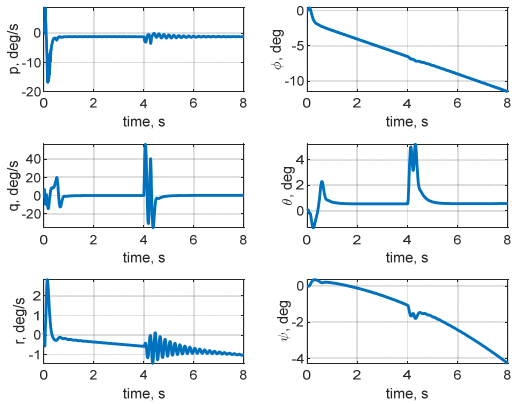


Fig. 34. Angular rate & attitude(depth tracking with cavitator only)

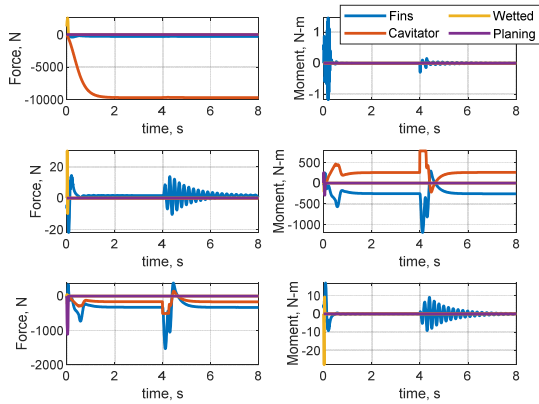


Fig. 35. External forces & moments(depth tracking with cavitator only)

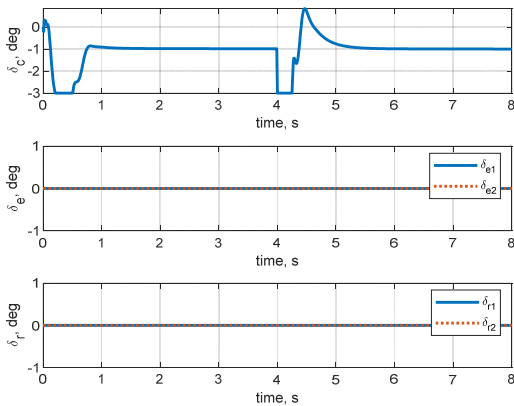


Fig. 36. Control surface deflections(depth tracking with cavitator only)

5. 결론

본 연구에서는 초공동 수중운동체의 6자유도 모델링과 자세 및 심도 제어를 위한 제어기를 설계하였다. 또한, 이를 이용하여 시뮬레이션 환경을 구축하였으며 초공동 수중운동체의 조종면 조합에 대한 안정성 해석 및 주행성능을 분석하였다. 캐비테이터뿐만 아니라 엘리베이터, 러더 및 차등 조종면을 동시에 적용한 경우 방향축 및 횡축의 안정화로 인해 심도 제어성능이 성공적으로 향상됨을 확인하였다. 다만, 핀의 유체계수나 플레잉 힘에 대하여 문헌데이터가 활용된 부분에 있어서는 모델링 불확실성이 어느 정도 되는지 가늠하기가 현재로서는 어렵다는 점을 고려해야 한다. 본 연구의 결과는 향후 초공동 수중운동체의 제어기법 개발 시에 조종면과 조종력 분배 등 제어기 설계 및 검증을 위한 분석 도구로써 활용될 수 있으며 개념 설계 시의 설계 검토 자료로써도 참고될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 LIG넥스원에서 수행한 “초공동 수중운동체 직진주행제어를 위한 형상설계 및 성능 분석 기술” 자체 선행연구 과제의 연구결과 중 일부분임을 밝힙니다.

References

- [1] Kim, S. H., & Kim, N., “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), 88-98, 2014.
- [2] Kim, S. H., & Kim, N., “Hydrodynamics and Modeling of a Ventilated Supercavitating Body in Transition Phase,” Journal of Hydrodynamics, 27(5), 763-772, 2015.
- [3] Kim, N., “A Study on L1 Adaptive Control based Operation Envelope Protection for a Supercavitating Underwater Vehicle,” Ph.D. Dissertation, Seoul National University, 2018.

- [4] Kim, S., & Kim, N., "Integrated Dynamics Modeling for Supercavitating Vehicle Systems," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(2), 346-363, 2015.
- [5] Savchenko, Y. N., "Experimental Investigation of Supercavitating Motion of Bodies," *UKRAINIAN ACADEMY OF SCIENCES KIEV INST OF HYDROMECHANICS*, 2001.
- [6] Logvinovich, G. V., and V. V. Serebryakov, "On Methods of Calculating form of Slender Axisymmetric Cavities," *J. Hydromech* 32, pp. 47-54, 1975.
- [7] Garabedian, P. R., "Calculation of Axially Symmetric Cavities and Jets," *Pacific Journal of Mathematics*, 6(4), 611-684, 1956.
- [8] May, A., "Water Entry and the Cavity-Running Behavior of Missiles(No. SEAHAC/TR-75-2)," *Navsea Hydroballistics Advisory Committee Silver Spring Md*, 1975.
- [9] Kirschner, I. N., Kring, D. C., Stokes, A. W., Fine, N. E., & Uhlman Jr, J. S., "Control Strategies for Supercavitating Vehicles," *Journal of Vibration and Control*, 8(2), 219-242, 2002.
- [10] Dzielski, J. E., "Longitudinal Stability of a Supercavitating Vehicle," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 36(4), 562-570, 2011.
- [11] Yen, Timothy, et. al., "Investigation of Cylinder Planing on a Flat Free Surface," *11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST*, Vol. 2011, 2011.