

Planing Avoidance Control for a Supercavitating Underwater Vehicle Based on Potential Functions

Seonhong Kim*, Nakwan Kim^{ID**}, Minjae Kim^{***}, Jonghoek Kim^{***} and Kurnchul Lee^{***}

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul national university, Seoul, Korea

**Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul national university, Seoul, Korea

***Agency for Defense Development, Changwon, Korea

포텐셜함수 기반 초공동 수중운동체 플레이닝 회피 제어 연구

김선홍* · 김낙완^{ID**} · 김민재^{***} · 김종혁^{***} · 이진철^{***}

*서울대학교 조선해양공학과

**서울대학교 해양시스템공학연구소

***국방과학연구소

KEY WORDS: Planing avoidance 플레이닝 회피, Supercavitating underwater vehicle 초공동 수중운동체, Potential function 포텐셜 함수, Planing estimation 플레이닝 예측, Planing protection 플레이닝 보호

ABSTRACT: In this paper, we focus on planing avoidance control for a supercavitating underwater vehicle based on the potential function method. The planing margin can be calculated using the relative position between the cavity center and vehicle center at the end of the vehicle. The planing margin was transformed into a limit variable such as the pitch angle and yaw angle limit. To prevent the vehicle attitude from exceeding the limit variable, a potential function based planing envelope protection method was proposed. The planing envelope protection system overrides commands from the tracking controller, and the vehicle attitude converges to a desired angle, in which the potential function is minimized. Numerical simulations were performed to analyze the physical feasibility and performance of the proposed method. The results showed that the proposed methods eliminated the planing, allowing the vehicle to follow tracking commands.

1. 서 론

초공동 수중운동체는 공동으로 운동체를 감싸 물과 접촉하는 면적을 없애므로써 동일한 추력에서도 월등한 전진속도를 얻을 수 있다. 초공동 수중운동체의 경우 운동체의 몸체가 공동안으로 들어와 있어 유체력을 발생시키지 않고 전면부의 캐비테이터와 제어핀의 일부만 공동 밖으로 나와 물과 접촉하면서 제어력을 발생시킨다. 이 때 공동 내부에서 주행하는 운동체의 몸체가 공동 벽과 충돌하면 플레이닝(Planing)이 발생하게 된다. 초공동 수중운동체는 일반적인 수중운동체 이상의 빠른 속도(100m/s 이상)에서 운용하기 때문에 플레이닝에 의한 유체력의 크기가 매우 크다. 따라서 플레이닝이 발생한 상황에서 운동체를 제어하는 것은 제어로직 및 제어관 성능의 한계 때문에 수행하기 어렵다. 따라서 플레이닝의 발생을 사전에 차단하기 위

한 플레이닝 회피 제어 연구가 필요하다.

최근 국내에서도 초공동 관련 기초연구가 국방과학연구소 주관으로 꾸준히 수행되고 있고 관련 논문도 다수 발표된 바 있다(Ahn et al., 2012; Kim and Lee, 2014; Kim and Kim, 2015a; Kim and Kim, 2015b). 초공동 수중운동체의 플레이닝 회피에 관한 연구도 국외에서 수행된 바 있다. Vanek(2008)에 의해 제안된 방법은 Receding-Horizon-control기법을 사용하였고 플레이닝을 목적함수에 포함시켰다. 플레이닝이 일어나는 조건에 대한 metric을 구하여 플레이닝 회피 제어를 수행하는 연구(Sanarria et al., 2014)도 수행된 바 있다.

본 연구에서는 초공동 수중운동체가 주행 중 플레이닝이 일어나지 않도록 운동체의 자세를 제한하는 플레이닝 회피 제어 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 기존에 수행된 연구는 공동의 크기 변화 및 공동 중심축 이동을 고려하지 않고 일정한

Received 18 December 2017, revised 23 May 2018, accepted 7 June 2018

Corresponding author Nakwan Kim:+82-02-880-7293, nwkim@snu.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9378-8372

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

크기의 공동을 가정하여 연구를 수행하였다. 또한, 플레이닝을 회피하기 위하여 새로운 제어기를 설계하였는데, 이러한 기법은 제어기 설계에 사용된 초공동 수중운동체의 동역학의 정확도가 제어기의 성능을 결정하기 때문에 실제 운용 상황에서 제어기의 성능을 보장할 수 없다. 본 연구에서 제안된 기법은 공동의 크기 및 중심축 변화를 모두 고려한 상태에서 수행되었으며, 포텐셜 기반 플레이닝 회피 알고리즘은 기존에 설계된 제어기와 독립적으로 작용하는 유도법칙을 생성하기 때문에 운동체 동역학에 대한 정보가 부족한 상황에서도 성능을 보장할 수 있다. 플레이닝 회피 알고리즘은 크게 플레이닝 예측과 플레이닝 보호로 나눌 수 있다. 플레이닝 예측은 공동과 운동체 사이의 상대위치를 통해 계산된 여유를 한계변수로 변환하여 수행하였고 플레이닝 보호는 포텐셜 함수를 기반으로 명령을 제한하는 방식을 사용하였다. 제안된 플레이닝 회피 제어기법은 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

2. 플레이닝 회피 제어기 설계

초공동 수중운동체의 플레이닝을 방지하기 위한 플레이닝 회피 제어 시스템 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 Tracking controller는 운동체에 인가된 명령(z_d, y_d)을 추종하기 위한 제어 입력을 결정하는 제어기이다. 플레이닝 예측(Planing estimator)은 플레이닝이 발생하는 순간의 상태변수 값(한계변수; θ_{lim}, ψ_{lim})을 예측, 계산하여 플레이닝 보호(Planing protection) 시스템으로 전달한다. 플레이닝 보호 시스템에서는 Tracking controller에 의해 결정된 제어 입력에 의한 운동체 자세 변화가 운동체 한계변수를 넘지 않도록 제어 입력(제어 명령)을 수정하는 역할을 수행한다. 이를 통해 수정된 제어 입력은 운동체 동역학 모델링에 전달되어 운동체의 상태변수를 계산하게 된다. 운동체 동역학 모델링은 Kim and Kim(2015a)의 모델링 기법을 통해 수행되었다.

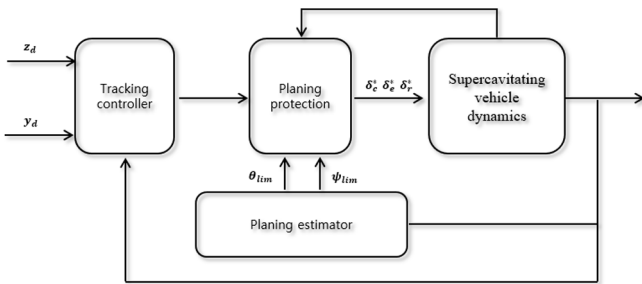


Fig. 1 Planing avoidance control system architecture for a supercavitating underwater vehicle

2.1 플레이닝 예측

운동체의 자세 변화가 플레이닝을 발생시키는지 여부를 판단하는 것이 플레이닝 예측이다. 그렇기 위해서는 플레이닝 발생하는 순간의 운동체 상태변수를 계산하여 이를 한계변수로 정의해야 한다. 본 연구에서는 운동체 한계변수를 종방향/횡방향으로 나누어 계산하였다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 운동체와 공동의 상대위치에 따른 종/횡축 회피한계를 나타내고 Fig. 2(c)는 종축 한계변수(θ_{lim})를 나타낸다. 플레이닝은 주로 운동체 후

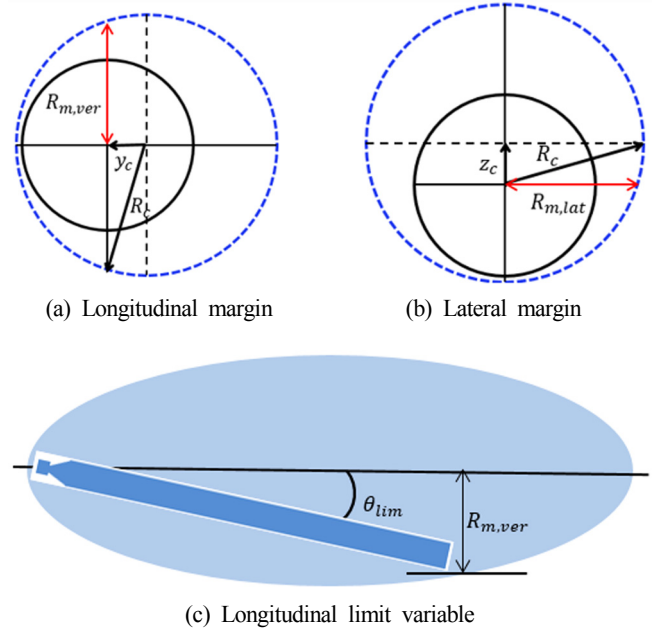


Fig. 2 Planing margin according to the relative position between cavity and vehicle

미에서 발생하며 이 때 공동의 중심과 운동체의 중심은 일치하지 않는다. 본 연구에서는 공동 중심과 운동체의 상대위치 및 공동의 크기를 계산하여 종/횡축방향 플레이닝 여유(R_m)를 계산하고 이를 식 (1)-(2)를 통해 종/횡축 한계변수로 나타내었다.

$$\theta_{lim} = \sin^{-1}\left(\frac{R_{m,ver}}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_t}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) \quad (1)$$

$$\psi_{lim} = \sin^{-1}\left(\frac{R_{m,lat}}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_t}{\sqrt{L_t^2 + R_v^2}}\right) \quad (2)$$

여기서, L_t 는 무게중심에서 운동체 후미까지의 거리이고 R_v 는 운동체 반지름이다. 공동의 크기가 작을수록, 운동체와 공동의 상대 위치가 멀수록 플레이닝의 여유는 감소하게 된다.

2.2 플레이닝 보호

플레이닝 한계변수가 결정되면 플레이닝 보호를 통해 운동체의 자세가 한계변수를 넘지 않도록 해야 한다. 본 연구에서는 항공기에 적용된 포텐셜 함수기반 비행영역보호(Flight envelope protection) 알고리즘을 초공동 수중운동체에 적용하였다(Sun et al., 2017). 포텐셜 함수 기반 명령 제한 기법은 식 (3)과 같은 포텐셜 함수를 정의하여 운동체의 자세명령을 제어한다.

$$U(\theta(t)) = U_{at}(\theta(t)) + U_{rep}(\theta(t)) \quad (3)$$

여기서, U_{at} 는 입력성분으로 한계변수가 기존의 제어명령을 추종하는 명령을 생성한다. U_{rep} 는 척력성분으로 운동체 자세가 한계변수를 넘지 않도록 하는 명령을 생성한다. 운동체가 종방향 운동만 한다고 가정하면 운동체의 페루프 시스템은 식 (4)-(6)

과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta}(t) = q(t), \theta(0) = \theta_0 \quad (4)$$

$$\dot{q}(t) = f_q(x) + g_q(x)u(t), q(0) = q_0 \quad (5)$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (6)$$

식 (5)에 의해 결정된 PI제어기의 종동요각속도 명령이 운동체 종동요각 정상상태 오차를 0으로 만드는 제어기라고 가정한다. 제어기는 PI제어기가 아닌 다른 제어기를 사용하여도 무방하다. 종동요 각속도 명령(q_{cmd})는 기존 Tracking controller 명령(q_r)과 플레잉 보호 시스템 명령(q_{FEP})으로 나눌 수 있다.

$$q_{cmd}(t) = q_r(t) + q_{FEP}(t) \quad (7)$$

플레잉 보호 시스템은 운동체의 종동요각이 한계보호 유발점(θ_t)을 넘는 순간, $\theta(t) \geq \theta_t$,에만 작동한다. 이를 이용하여 식 (3)의 포텐셜 함수를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$U_{at}(\theta(t)) = \zeta(\theta_{lim} - \theta(t)) \quad (8)$$

$$U_{rep}(\theta(t)) = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ \frac{1}{2}(\theta(t) - \theta_t)^2 & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases}$$

포텐셜 함수를 통해 결정된 종동요각속도 명령은 정상상태에서 포텐셜 함수의 값을 최소화시키는 값으로 수렴하게 된다. 이 수렴값을 계산하기 위해 Gradient descent method를 적용하면 식 (9)-(10)과 같다.

$$\nabla U(\theta(t)) = \nabla U_{at}(\theta(t)) + \nabla U_{rep}(\theta(t)) \quad (9)$$

$$= \begin{cases} -\zeta & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ -\zeta + (\theta(t) - \theta_t) & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases}$$

$$\dot{\theta}(t) = \beta(t) \nabla U(\theta(t)) \quad (10)$$

Gradient descent method에 의해 발생된 식 (10)의 명령은 종동요각속도와 같은 차원이다. 따라서 $q_{cmd} = \beta(t) \nabla U(\theta(t))$ 라 하면 식 (7)은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{cmd}(t) = q_r(t) + q_{FEP}(t) \quad (11)$$

$$= \begin{cases} -\beta(t)\zeta & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ -\beta(t)\zeta + \beta(t)(\theta(t) - \theta_t) & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases}$$

여기서 종동요각이 유발점보다 작은 경우의 종동요각속도 명령은 Tracking controller 명령과 같다($-\beta(t)\zeta = q_r(t)$). 정상상태에서는 포텐셜함수는 최소값으로 수렴하고 운동체의 종동요각속도 및 종동요각속도 명령은 0이 되고,

$$q_r(t) + \beta(t)(\theta(t) - \theta_t) = 0 \quad (12)$$

이 때 운동체가 정상상태에서 수렴하는 종동요각을 목표 종동요각 (θ_d)로 정의하면 식 (13)과 같은 결과를 얻는다.

$$\beta(t) = -\frac{q_r(t)}{\theta_d - \theta_t} \quad (13)$$

이를 식 (11)에 대입하면 운동체의 종동요각 명령을 결정할 수 있다. 최종 포텐셜 함수는 식 (14)와 같이 표현되며 이를 Fig. 3에 나타내었다.

$$U(\theta(t)) = \begin{cases} (\theta_d - \theta_t)(\theta_{lim} - \theta(t)) & \text{if } \theta \leq \theta_t \\ (\theta_d - \theta_t)(\theta_{lim} - \theta(t)) + \frac{1}{2}(\theta(t) - \theta_t)^2 & \text{if } \theta > \theta_t \end{cases} \quad (14)$$

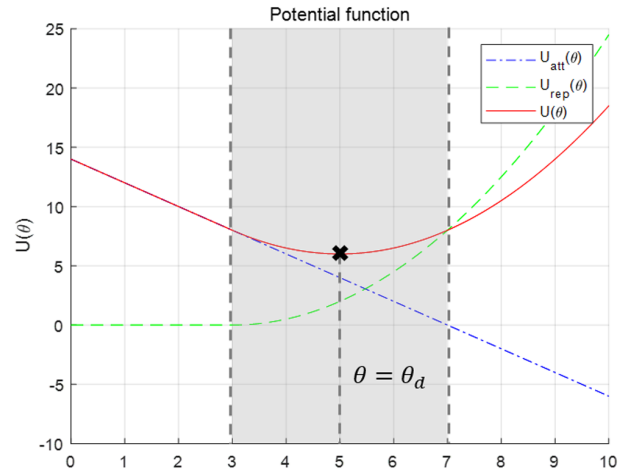


Fig. 3 Potential function for planing avoidance control

3. 수치 시뮬레이션

제안된 초공동 수중운동체의 플레잉 회피 제어 알고리즘을 검증하기 위해서 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 Tracking controller의 종동요각속도 명령(q_r)을 5초를 기준으로 $q_r = \pm 0.1 \text{ rad/s}$ 로 주었을 때 각각 종동요각(θ)과 종동요각속도 명령(q_{cmd})을 보여준다.

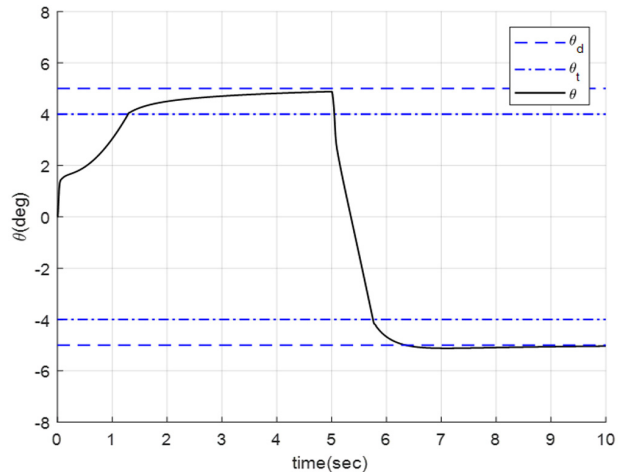


Fig. 4 Pitch angle response with planing avoidance control

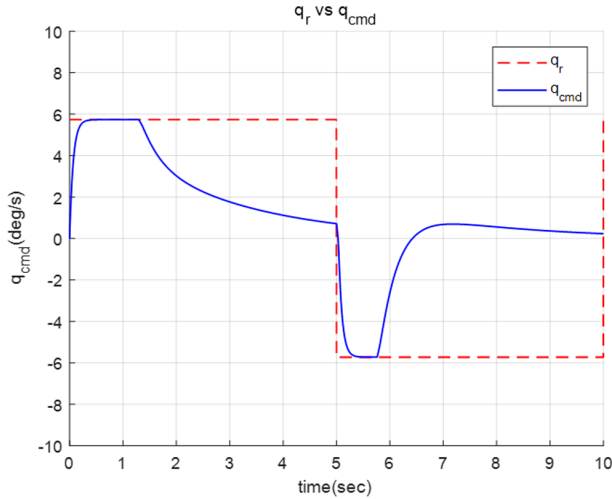


Fig. 5 Comparison of q_r and q_{cmd}

유발점과 목표 종동요각은 각각 4° 와 5° 이다. 종동요각이 유발점에 도달하기 전에는 종동요각 명령을 추종하여 증가하지만 유발점을 지나는 순간부터 포텐셜함수의 척력성분이 작용하여

종동요각 명령(q_{cmd})이 줄어들면서 종동요각을 목표종동요각(θ_d)으로 수렴시키는 것을 확인할 수 있다.

초공동 수중운동체가 수중주행할 때에는 공동 벽면과 운동체 후미와의 거리에 따라 수시로 변하기 때문에 종동요각 한계변수 역시 상수가 아닌 변하는 값을 가지게 된다. 따라서 유발점과 목표 종동요각도 종동요각 한계변수에 따라서 실시간으로 변하는 값을 가지게 된다. Figs. 6-8은 심도 변경 주행을 하는 초공동 수중운동체의 플레잉 회피 시뮬레이션 결과를 보여준다.

Fig. 6은 운동체 종동요각 제한과 목표 종동요각, 유발점 및 운동체 종동요각을 보여준다. 이 때 목표 종동요각과 유발점은 한계종동요각과 각각 0.5° , 2° 차이가 나게 설정하였다. 심도 명령은 20m에서 시작해 5초, 10초, 15에서 각각 5m씩 변화를 주었다. 심도를 변경하기 위해서는 운동체의 종동요각을 변화시켜야 한다. 이 때 운동체의 종동요각이 플레잉 예측에서 계산된 종동요각 한계변수값(θ_{lim})을 넘지 않도록 플레잉 보호 시스템이 작동된다. Fig. 7은 위에서부터 차례대로 x축방향 이동거리, 심도, 종동요각을 Fig. 8은 전진속도, 상하동요속도, 종동요각속도를 보여준다.

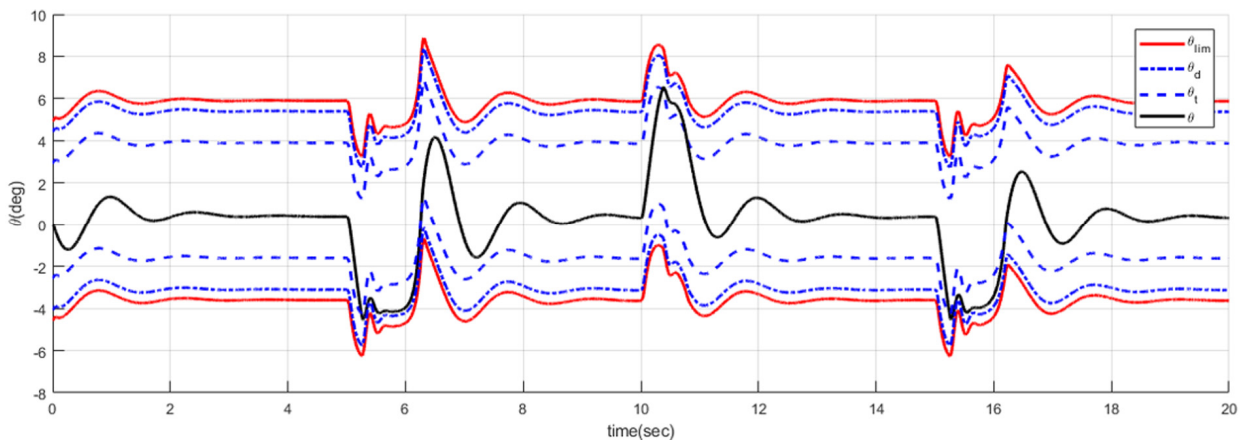


Fig. 6 Pitch limit, desired pitch angle, trigger point and vehicle pitch angle with planing avoidance control

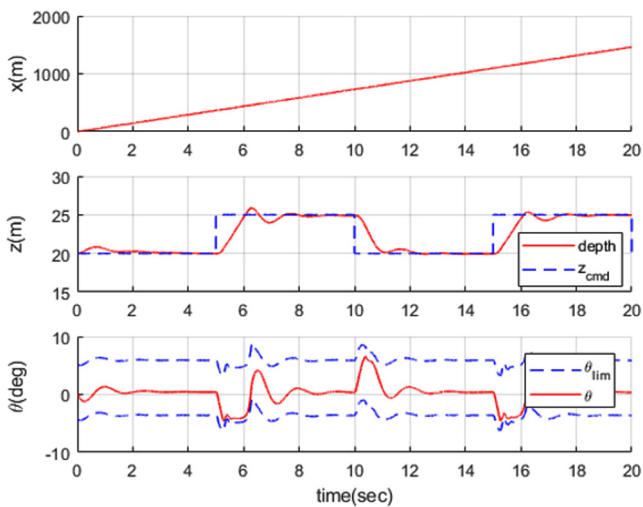


Fig. 7 Distance, depth, pitch angle response of depth tracking supercavitating underwater vehicle

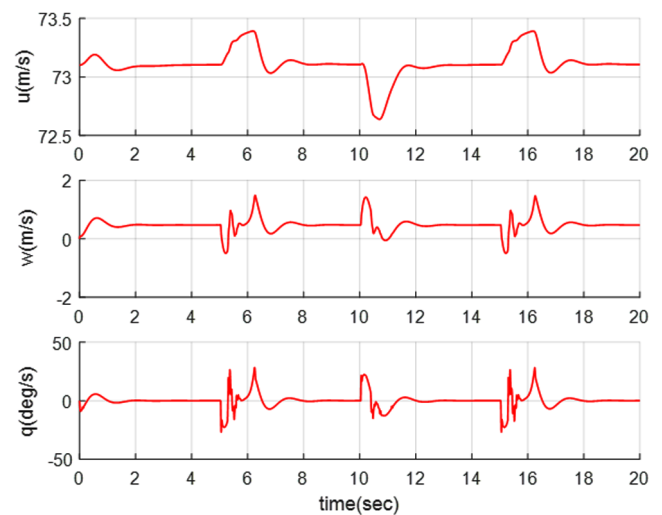


Fig. 8 Forward/heave velocity, pitch rate response of depth tracking supercavitating underwater vehicle

4. 결 론

본 논문에서는 초공동 수중운동체의 플레이닝 회피 제어에 관한 연구를 수행하기 위하여 포텐셜함수 기반 플레이닝 회피 알고리즘을 제안하였다. 플레이닝 회피 알고리즘은 운동체의 자세를 제어하기 위한 유도법칙으로 초공동 수중운동체가 플레이닝을 발생시키지 않고 주행할 수 있도록 유도명령을 생성한다. 본 연구에서 사용된 포텐셜함수 기반 플레이닝 회피기법은 운동체의 동역학에 대한 정확한 정보 없이도 유도법칙을 생성할 수 있다. 또한, 유도법칙이 제어기와 분리되어 독립적으로 작동하기 때문에 기존에 설계된 제어기의 변경 없이 제안된 기법을 추가함으로써 플레이닝 회피 성능을 확보할 수 있다.

제안된 기법을 초공동 수중운동체 동역학 모델링과 결합하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 플레이닝 회피 및 심도명령 추종성능을 동시에 만족할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원 민군기술협력센터(위탁과제명 : 발음각 변화 및 분사에 따른 공동 유지 및 제어 연구, 과제번호 14-BR-EN-32)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), 123-131.
- Kim, H.T., Lee, H.B., 2014. 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), 435-449.
- Kim, S., Kim, N., 2015a. Integrated Dynamics Modeling for Supercavitating Vehicle Systems. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(2), 346-363.
- Kim, S., Kim, N., 2015b. Neural Network-based Adaptive Control for a Supercavitating Vehicle in Transition Phase. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), 454-466.
- Sanabria, D.E., Balas, G.J., Arndt, R.E., 2014. Planing Avoidance Control for Supercavitating Vehicles. In *2014 American Control Conference*, IEEE, 4979-4984.
- Sun, D., Li, X., Jafarnejadsani, H., Hovakimyan, N., 2017. A Flight Envelope Protection Method Based on Potential Functions. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Grapevine, TX, USA, 1024.
- Vanek, B., 2008. Control Methods for High-Speed Supercavitating Vehicles. Ph.D. Dissertation, University of Minnesota.