Check for updates

동력시스템공학회지 제29권 제4호 pp. 52-59 2025년 8월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online)
Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2025.29.4.052
Vol. 29, No. 4, pp. 52-59, August 2025

호스로 연결된 드론과 보트의 협조 제어 시스템 구축에 관한 연구 : 수평 프로펠러와 워터제트 추진기로 구성한 하이브리드 구조

Cooperative Control of a Hose-Connected Drone and Boat Using Horizontal Propellers and a Waterjet Thruster

박정석* · 휜틴** · 김영복*** †
Jung-Suk Park*, Thinh Huynh** and Young-Bok Kim*** †

(Received 30 July 2025, Revision received 22 August 2025, Accepted 22 August 2025)

초록 : 본 연구에서는 소형 보트에 탑재되는 화재진압용 드론을 동시에 제어하는 방법에 대해 고찰하고 있다. 드론과 보트는 호스로 연결된 구조를 가지며, 이러한 특성으로 인해 드론 단독의 운동제어만으로는 화재진압, 수색 등의 설정되는 목적을 달성하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해, 고도제어를 위한 워터제트 추진기에 4개의 수평 프로펠러를 활용하여 평면운동을 제어하는 새로운 하이브리드 시스템을 제안한다. 기존에 워터제트 추진기는 고도제어를 수행하고, 4개의 수평 프로펠러는 회전운동, 전진 및 후진 운동을 효과적으로 제어하는 방법을 연구하였다. 제안된 시스템에 대한 수학적 제어모델을 구성하였으며, 경계 제어기법으로 제어기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 평가하였다. 결론적으로 워터제트 추진기에만 의존하는 기존 시스템보다 정교하고 안정적인 제어성능을 확보할 수 있었다. 안정성 조건은 Lyapunov 안정성 이론에 기반하여 도출되었으며, 시뮬레이션을 통해 제안된 시스템의 유효성을 검증하였다.

키워드 : 드론, 보트, 호스, 워터제트, 수평 프로펠러

Abstract : This study explores a method for simultaneously controlling a fire-fighting drone mounted on a small boat. Since the drone and the boat are connected by a hose, it is difficult to achieve designated tasks such as fire suppression and search operations through drone control alone. To address this, we propose a novel actuator system that utilizes four horizontal propellers to control planar motion, while maintaining the conventional waterjet propulsion mechanism for altitude control. The system enables effective control of rotational, forward, and backward motions by appropriately adjusting the four propellers, thereby decoupling the planar motion from vertical movement. A control model of the proposed system is developed, and a boundary control strategy is designed accordingly. The effectiveness of the system is evaluated through simulations. As a result, the proposed system achieves more precise and stable control performance compared to existing systems that rely solely on waterjet propulsion.

Key Words : Drone, Boat, Hose, Waterjet, Horizontal Propeller

*** † 김영복(https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : 교수, 국립부경대학교 기계시스템공학전공
E-mail: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*박정석(https://orcid.org/0000-0001-8165-7773) : 2등 기관사, 국립부경대학교 실습선 백경호
**휜틴(https://orcid.org/0000-0001-7329-8432) : 조교수, 국립부경대학교 스마트모빌리티공학과

*** † Young-Bok Kim(https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*Jung-Suk Park(https://orcid.org/0000-0001-8165-7773) : 2nd Engineer, Training Ship Backkyong, Pukyong National University.
**Thinh Huynh(https://orcid.org/0000-0001-7329-8432) : Assistant Professor, Department of Smart Mobility Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

최근 임베디드 기술, 초경량 소재, 인공지능(AI) 알고리즘의 발전은 드론 및 무인 항공 시스템(UAV)의 설계 및 운영을 이전보다 더욱 실용적이고 효율적인 방식으로 가능하게 만들었다. 이러한 기술적 진보 덕분에 드론 산업은 규모와 성장 속도 면에서 빠르게 발전하고 있다.[1,2)]

해양산업 분야에서도 드론의 활용은 선박 상태 점검, 인명 탐색, 환경 관측 등 다양한 분야로 확산되고 있다.[3-5)] 해류, 수질, 기상 정보와 같은 데이터를 실시간으로 수집함으로써, 작업현장에서 보다 정확하고 즉각적인 의사결정을 내릴 수 있게 되었고, 이는 항해 안정성 향상, 항로 최적화, 환경 보호 등에 기여하고 있다. 나아가, 드론의 활용은 재난 구조 및 화재진압 등 고위험 분야로도 확대되고 있다.[6)]

그러나 기존 드론 구조는 여전히 특정 환경이나 작업 조건에서 본질적인 제약을 갖는다. 전통적으로 드론은 고정익 또는 회전익 방식으로 구분된다. 고정익은 장거리 비행에는 효율적이지만 정지 비행이나 협소 공간 내 조종이 불가능하며, 넓은 이·착륙 구역이 필요하다는 점에서 실용성이 떨어진다. 반면 회전익 드론은 뛰어난 기동성과 수직 이착륙 기능을 제공하지만, 저속 비행 시 비효율적이며 기계구조가 복잡하고 정밀제어가 어렵다는 한계도 있다.

대부분의 드론은 전력을 배터리에 의존하므로 비행시간과 탑재 능력 면에서도 제약이 크다.[3,7,8)] 특히 화재진압과 구조작업과 같은 위험 환경에서는 프로펠러 회전으로 발생하는 바람이 불꽃을 확산시켜 오히려 화재진압 효과를 저해하는 위험요소로 작용할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 해서 기존 추진방식의 대안을 모색하는 연구가 진행되어 있다. 그중 하나가 수력을 활용한 비행 시스템이 주목받고 있다.

수력 기반 비행 시스템(UWAV: Unmanned Waterborne Aerial Vehicle)은 고압의 물 분사력을 이용하여 비행체를 띄우고 조종한다. 이 방식은 배터리 의존도를 줄이고 회전식 프로펠러의 위험을 제거하는 동시에, 수중 환경이나 열악한 조건에서 장시간 작동할 수 있는 강점을 지닌다. 시스템 구성은 펌프, 호스, 비행 본체로 이루어지며, 압축된 물이 노즐을 통해 방출되면서 추진력을 발생시킨다.[9-11)]

이때, 드론의 부상을 통한 고도를 유지하거나 변경하기 위한 수력 제어는 크게 두 가지 방식으로 분류된다. 하나는 밸브를 활용해 분사 유량을 조절하는 방식[11)](Fig. 1 (a)), 다른 하나는 노즐 방향을 회전시켜 추진 방향을 제어하는 방식이다[9,10,12-16)](Fig. 1 (b)). 전자는 높은 정밀도의 액추에이터와 큰 전력이 요구되며 유량 변동성으로 인해 시스템 안정성을 확보하는 것이 어렵다. 후자의 경우, 다수의 노즐이 고압 조건에서 협조적으로 회전해야 하므로 설계 및 제어가 매우 까다롭다. 이로 인해, 실제 구현된 시스템들은 작동 범위가 제한적이며 기동성이나 안정성 면에서 미흡한 경우가 많다.

또한 수력 시스템은 하나의 추진원으로 힘과 토크를 동시에 생성하기 때문에, 특정 방향의 운동을 조절할 경우, 고도 유지에 영향을 미쳐 제어를 통해 바람직한 제어성능을 확보하기가 어렵다. 이러한 기술적 한계를 극복하기 위해, 수직(고도) 추진은 물을 통해 유지하면서, 수평 방향의 조종을 위한 독립적인 제어시스템을 사용하는 하이브리드 구조가 필요하다. 이 방식은 각 운동 방향의 제어를 분리함으로써 기동성과 조작성 향상에도 기여할 수 있다. 예컨대, Dinh et al.[11)]은 무게 이동 기반의 제어시스템을 제안한 바 있다(Fig. 1 (c)).

(a) (b) (c)

Fig. 1 Considered flying robots based on three different type actuator : (a) fixed nozzle type, (b) rotatable nozzle type, (c) moving-mass type

이 방식은 비행 로봇의 상부에 가변 질량 블록을 설치하여 로봇의 자세와 이동을 유도하는 것이다. 무게 중심 이동을 통해 필요한 힘과 회전력을 생성하는 방식으로 구조는 간단하지만, 장치의 전체 무게가 증가하고 비최소 위상 현상으로 인해 응답성이 떨어지는 문제가 있다. 결과적으로 더 높은 수준의 자율성과 안정성을 갖춘 수력 기반 비행 로봇에 대한 요구가 증가하고 있다.

본 논문에서는 이러한 기존 방식의 단점을 극복하기 위해 Fig. 2와 같이 공기 추진력을 활용한 새로운 수력 비행 시스템을 설계하였다. (프로펠러 주요 스펙은 Table 1 참고)

구체적으로, 비행체 상단에 네 개의 수평 프로펠러를 탑재하여 공기 흐름으로 힘과 토크를 발생시킨다. 이 방식은 전체 질량 증가 없이 기동성을 확보할 수 있으며, 비최소 위상 문제도 동시에 해결한다. 제안된 시스템은 기존 수력 로봇에 최소한의 구조 변경만으로도 적용이 가능하며, Fig. 3에 나타낸 것과 같이 해상 화재 진압과 같이 실질적 응용 가능성이 크다.

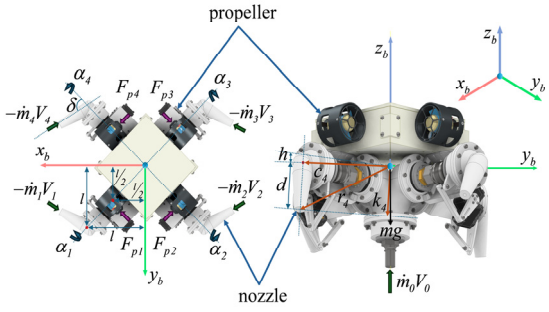

Fig. 2 A proposed flying robot with a hybrid type actuator system

Table 1 Propeller specifications

Item(photo)	Description
	- Brand : QX Motor 3,500 KV - Type : Brushless Motor Blades - Diameter : 70 mm - Max thruster force : 950 g - Max continuous power : 550 W - Max continuous current : 45 A

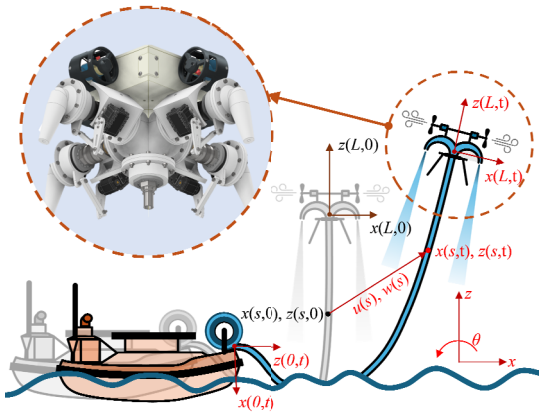

Fig. 3 Design of the drone with a hybrid type actuator and coordinates system definition

또한 카메라, 센서, 소화 장비 등을 탑재하면 사용환경 제약 없이 다양한 임무 수행도 가능하다.

그래서 본 연구에서는 유연한 호스로 연결된 드론과 워터제트 추진 보트로 구성된 새로운 계류형 수공중 시스템을 제안하고, 이를 위한 협조 제어기를 설계하였다. 제안된 시스템은 드론이 보트의 추진력에만 의존하지 않고, 수평 프로펠러를 함께 활용하여 기동성을 향상시키는 하이브리드 수공기 역학 시스템이다. 드론과 보트를 하나의 시스템으로 구성하면 해양에서는 다양한 목적으로, 효과적으로 작업수행이 가능할 것이다.

이를 위해 시스템의 수학적 모델을 구성하고, 드론과 보트의 동작을 통해 전체 시스템의 동작을 제어하는 경계 제어 기법을 설계하였다. 시스템의 안정성은 Lyapunov 방법을 통해 분석하였고, 두 개의 액추에이터를 기반으로 평면상에서의 운동을 대상으로 수치 시뮬레이션을 통해 설계된 제어기의 성능을 검증하였다.

2. 모델링

Fig. 3에서, 호스를 따라 정의된 곡선 좌표 s는 호스가 보트에 설치된 윈치에서 풀려나오는 점을 원점으로 한다. 시스템의 운동학을 설명하기 위해 두 개의 기준 좌표계를 사용한다. 하나는 초기 호스 중심선상에 위치한 P_0를 기준으로 하며, 이때

z축은 곡선 좌표 s의 접선 방향이다. 임의의 시간 t에서, 초기 위치 P_0에서의 한 요소는 새로운 위치 P로 이동한다. 두 번째 좌표계는 이동 중인 호스에 두며 P를 기준으로 한다. 이때 수평면 운동은 z 및 x축 방향의 병진 운동과 y축 회전(강체의 경우, y축에 대한 회전각도 θ)으로 구성되며, 변위벡터 $\overrightarrow{P_0P}$ 는 $[u(s,t)\ w(s,t)]^T$로 나타낸다.

시스템의 평면운동은 편미분 및 상미분 방정식의 결합 형태로 다음과 같이 표현된다.[13,14]

$$(m+M)\ddot{\zeta}(s) = v\boldsymbol{A}\zeta^{(4)}(s)+\boldsymbol{B}\zeta''(s) + \boldsymbol{C}\dot{\zeta}(s)+\boldsymbol{D}\dot{\zeta}'(s)+\boldsymbol{W}(s) \quad (1)$$

여기서,

$$\zeta(s)=\begin{bmatrix}u(s)\\ w(s)\end{bmatrix},\ \zeta'(s)=\frac{\partial\zeta(s)}{\partial s},\quad \zeta''(s)=\frac{\partial^2\zeta(s)}{\partial s^2},\ldots, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-EI & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\dfrac{-M\dot{m}_h^2}{A_h^2\rho^2} & 0\\ 0 & \dfrac{EI}{R_0^2}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}-c_u & 0\\ 0 & -c_w\end{bmatrix},\ \boldsymbol{D}=\frac{-M\dot{m}_h}{A_h\rho}\begin{bmatrix}2 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{W}(s)=\begin{bmatrix}\dfrac{-M\dot{m}_h^2}{R_0A^{2_h}\rho^2}-g(m+M)\sin\theta+d_u(s)\\ -g(m+M)\cos\theta+d_w(s)\end{bmatrix}$$

여기서, m: 호스의 단위 길이당 질량, EI : 휨강성, A_n: 단면적, R_0: 곡률 반경이다. 그리고 M : 내부를 이동하는 호스 단위 길이당 유체 질량, ρ : 유체 밀도, g: 중력가속도, $d_u(s), d_w(s)$는 외란 항을 나타낸다. 단, 유량은 펌프의 속도 제어를 통해서만 조절이 가능하다. $s=L$ 지점에서의 경계 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$M_h\ddot{\zeta}(L)=B_L\begin{bmatrix}F_{px}\\ \dot{m}_h^2\end{bmatrix}+A_L\zeta^m(L)+C_L\zeta^n(L) + D_L\zeta'(L)+W_L(L) \quad (3)$$

$$J_{yh}\ddot{\theta}(L)=-hF_{px}-EI\left[u''(L)+\frac{1}{R_0}w'(L)\right] + d_\theta(L)$$

이때,

$$B_L=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \dfrac{h_0\cos\sigma}{4A_n\rho}\end{bmatrix},\ A_L=\frac{EI}{R_0}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix},\quad (4)$$
$$C_L=\frac{EI}{R_0}\begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{bmatrix},\ D_L=\frac{EI}{R_0^2}\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix}$$

보트의 운동은 다음식으로 표현한다.

$$M_b\ddot{w}(0)=X_u\dot{w}(0)+\tau_x-\frac{EI}{R^{2_0}}w'(0)+d_w(0), \quad (5)$$
$$u(0)=0,\ u'(0)=0,\ \theta(0)=0$$

이때, M_h와 J_{yh}는 드론의 질량 및 관성 모멘트이며, F_{px}는 수평 프로펠러로 생성된 총 수평추력, h는 프로펠러와 드론 중심 사이의 수직 거리이다. 각 프로펠러의 추력은 회전속도 Ω의 제곱에 비례한다. 따라서 F_{px}와 $\dot{m}_h$는 드론의 제어입력이며, 펌프 및 프로펠러의 동작을 통해 제어력을 분배할 수 있다.

보트의 종방향 운동에서, M_b는 부가질량을 포함한 전체 질량이며, X_u는 유체 감쇠 계수, τ_x는 제어 가능한 추진력이다.

3. 제어기 설계

해상에서의 임무수행을 위해 드론과 보트는 목표 지점 추종 또는 궤적 추종 등 특정 동작을 수행해야 하며, 동시에 호스의 안정성도 유지되어야 한다. 따라서 호스 상단(드론 측)과 하단(보트 측)에서 각각의 경계 제어기법을 도입하여 제어계를 설계한다.

드론이 도달해야 할 목표 고도는 z_{hd}, 측방향 위치는 x_{hd}로 설정하면 오차벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\boldsymbol{e}_L = \begin{bmatrix} x(L) - x_{hd} + \mu\theta \\ z(L) - z_{hd} \end{bmatrix} \tag{6}$$

측방향, 즉 횡방향 이동에서의 추종오차와 피치각은 동일한 제어입력에 의해 결정되므로, 이들은 결합된 형태로 표현되어야 한다.

이와 유사하게, 보트의 목표 위치 x_{bd}에 대한 추종오차 $e_b = x(0) - x_{bd}$ 역시 통합적으로 고려될 수 있다. 이에 따라 Lyapunov 함수 후보로는 다음과 같은 식을 제안한다.

$$V = V_1 + V_2 > 0 \tag{7}$$

여기서, V_1, V_2는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2}\int_0^L \dot{\zeta}(s)^T \boldsymbol{a}_1 \dot{\zeta}(s) ds + \frac{1}{2}\int_0^L \zeta''(s)^T \boldsymbol{a}_2 \zeta''(s) ds \\ &\quad + \frac{1}{2}\int_0^L \zeta'(s)^T \boldsymbol{a}_3 \zeta'(s) ds \\ V_2 &= \frac{1}{2}\int_0^L \boldsymbol{e}_L^T \boldsymbol{e}_L dt + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_L^T \boldsymbol{b}_1 \boldsymbol{e}_L + \frac{1}{2}\dot{\zeta}(L)^T \boldsymbol{b}_2 \dot{\zeta}(L) \\ &\quad + \frac{b_3}{2} e^{2_b} + \frac{b_4}{2} x(0)^2 \end{aligned} \tag{8}$$

$\boldsymbol{a}_1 \sim \boldsymbol{a}_3$, $\boldsymbol{b}_1, \boldsymbol{b}_2$는 양의 대각 행렬이고, b_3, b_4는 양의 상수이다. V_1은 호스의 안정성과 변형을 나타내며, V_2는 드론과 보트의 경계운동을 나타낸다. 이때 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{a}_1 \boldsymbol{A} = -6(m+M)\boldsymbol{a}_2, \ \boldsymbol{a}_1 \boldsymbol{B} = (m+M)\boldsymbol{a}_3, \\ &M_h \boldsymbol{a}_1 \boldsymbol{A} + 3(m+M)\boldsymbol{b}_2 \boldsymbol{A}_L = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

이러한 조건을 바탕으로 경계 제어법칙은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{px} \\ \cdot^2 \\ m_h \end{bmatrix} &= \boldsymbol{K}_1 \zeta''(L) + \boldsymbol{K}_2 \zeta'(L) + \boldsymbol{K}_3 \boldsymbol{e}_L \\ &\quad + \boldsymbol{K}_4 \int_0^t \boldsymbol{e}_L dt + \boldsymbol{K}_5 \dot{\zeta}(L), \\ \boldsymbol{\tau}_x &= h_1 \dot{w}(0) + h_2 w'(0) + h_3 e_b \end{aligned} \tag{10}$$

여기서, $\boldsymbol{K}_i \ (i = 1 \sim 5)$는 드론 운동제어를 위한 제어 이득 행렬, $h_j \ (j = 1 \sim 3)$는 보트 운동 제어 파라미터이다. 결론적으로 각 제어 이득은 다음과 같이 설정된다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{b}_2 \boldsymbol{B}_L \boldsymbol{K}_2 &= \frac{1}{m+M}\boldsymbol{a}_1 \boldsymbol{B} - \boldsymbol{b}_2 \boldsymbol{D}_L, \\ \boldsymbol{b}_2 \boldsymbol{B}_L \boldsymbol{K}_5 &= \frac{1}{2(m+M)}\boldsymbol{a}_1 \boldsymbol{D}, \\ h_1 &= -X_u, \ h_2 = EI/R^{2_0} \end{aligned} \tag{11}$$

Lyapunov 함수 V의 시간 미분에 제어법칙을 대입하고, 제어 이득의 크기를 충분히 크게 설정하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} \le &-\alpha_1 \dot{\zeta}(L)^T \dot{\zeta}(L) - \alpha_2 \int_0^L \dot{\zeta}(s)^T \dot{\zeta}(s) ds \\ &- \alpha_3 \dot{w}^2(0) + \alpha_4 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, $\alpha_i \ (i = 1 \sim 4)$는 양의 상수이다. 따라서 위의 식 (1)의 경계 제어법칙은 시스템의 유계성을 보장한다.[15,16]

Remark 1 : Lyapunov 함수의 미분함수 $\dot{V}$에는 편미분 항이 포함되어 있지 않다. 이것은 호스의 안정성은 보장하지만 호스의 변형을 제어하여 안정화 할 수 있다는 것은 아니다.

Remark 2 : 제어법칙에 포함된 편미분 항은 경사계측기 및 전단력 센서 등의 센서로 측정 가능하며, 다음과 같은 유한 차분법으로도 추정하는 것도 가능하다.[17]

$$\begin{aligned} \zeta'(s) &= \frac{\zeta(s) - \zeta(s - \Delta s)}{\Delta s}, \\ \zeta'' &= \frac{\zeta(s + \Delta s) - 2\zeta(s) - \zeta(s - \Delta s)}{\Delta s^2} \end{aligned} \tag{13}$$

4. 시뮬레이션

4.1 제어이득 계산

제안된 시스템을 검증하기 위해, 수식 모델(식 (1)~(5))과, 식 (10)의 제어칙을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유연한 호스의 사양은 참고문헌을 참고하였다.[8] 무인 보트는 부가질량을 포함하

여 질량이 660 kg이며, 저속 조건 아래에서 유체 감쇠 계수는 작다고 가정하였다. 드론은 두 부분으로 구성된다. 즉, 호스에서 공급된 물을 4개의 노즐로 분배하는 매니폴더와 수평 추진력을 생성하는 4개의 프로펠러 어셈블리이다. 이때, 매니폴더부에서 각 노즐의 토출구 직경은 6 mm, 경사각은 30°이다.

프로펠러 추력 계수는 추력 시험벤치를 활용하여 입력(0~100%)에 따른 추력 데이터를 계측한 후 Matlab Curve Fitting을 통해 산출하였다. 계측된 추력 계수 값은 $1.39\times10^{-2}\ \mathrm{N/rpm^2}$이다. 프로펠러는 헤더부 질량 중심에서 11 mm 위에 수평 상태로 배치된다.

여기서, 드론의 총무게는 6.37 kg, y 축 회전 관성은 $9.7\times10^{-2}\ \mathrm{kg\cdot m^2}$이고, 이는 Autodesk Inventor 2021을 이용하여 설계된 프로토타입 3D 모델을 기반으로 산출하였다.

이것으로부터 구한 제어기 각각의 이득은 다음과 같이 구하였다.

$$\boldsymbol{K}_3 = -\mathrm{diag}\{20000, 30\},\ \boldsymbol{K}_4 = -\mathrm{diag}\{22, 5\},$$
$$\boldsymbol{K}_1 = -\mathrm{diag}\{11, 15\},\ h_3 = 1200, \mu = 50 \qquad (14)$$

4.2 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션에서, 보트는 0.5 m 지점에서 이동을 시작하여 후진하여 출발 지점으로 복귀한다. 동시에 드론은 1.5 m 고도에서 2.1 m까지 상승하고, 측방으로는 원점기준 2 m 지점에서 0.5m 지점까지 평행 이동하도록 경로를 설정하였다.

본 연구에서는 보트의 운동 중 연성 효과가 가장 크게 작용하는 종방향 운동에 초점을 맞추어 해석하였다. 이는 호스 장력과 물 유량 반작용이 주로 종방향 운동에 영향을 미치기 때문이다. 이러한 설정 아래, 시뮬레이션 결과를 Fig. 4~6에 나타내었다.

Fig. 4는 드론과 보트의 시간 응답을 나타낸다. 드론은 설정된 목표 고도에 정상상태 오차 없이 도달하였다. 그러나 수평이동에서는 0.2 m 정도의 작은 오차가 발생하였으나 충분히 양호한 추종성능을 달성한 것으로 판단한다. 피치 각도 추종오차는 2° 이내로 유지되어 비행의 안정성이 충분히 확보될 수 있다는 것을 알 수 있다.

하지만 Fig. 4에서, θ(피치각), $z(L)$(고도), $x(L)$(수평이동거리)의 출력특성에서 과도상태에서의 응답에서 진동적인 현상이 나타난다. 특히 세 개의 출력에서 주파수 특성이 동일하며, 이것은 동일한 제어입력 F_{px}로 인하여 수평운동과 회전운동이 그 영향을 받는다는 것을 의미한다. 그러나 보트의 종방향 운동 $x(0)$는 관성의 영향으로 진동적인 특성이 나타나지 않는다.

Fig. 5는 호스의 운동특성을 나타낸다. 이때 호스의 위치 변화는 제안된 경계 제어기법의 적용으로 상당히 안정적으로 유지되고 있다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 6은 경계 제어입력을 나타낸다. 즉, 제어입력은 $\boldsymbol{\tau}_x$이고, 이것은 제어력 분배법칙에 따라 호스를 통과하는 질량유량 $\dot{m}_h$과, 4개의 프로펠러 회전속도 $\Omega_i\,(i=1\sim4)$를 제어하게 되고, 그 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 즉, 드론의 고도는 유량 제어로, 측방 및 회전운동은 프로펠러 속도 제어로 조절된다. 보트의 종방향 제어력은 보트가 정지해야 할 지점에서도 '0'이 아니다. 이는 당연한 사실로, 호스 장력 및 물 유량 반작용에 의한 외력에 대응하면서 보트의 위치 유지를

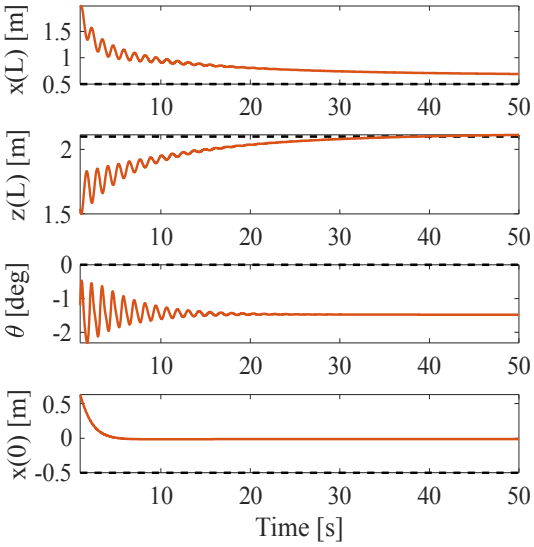

Fig. 4 Motions the drone and the boat

위한 제어력이 작용하고 있다는 것을 의미한다.

결론적으로 시뮬레이션 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉, 경계 제어기법의 적용을 통해 유연한 호스의 거동을 효과적으로 제어할 수 있었다. 드론과 보트가 연결된 구조이므로 호스의 운동제어를 적극적으로 고려함으로써 드론과 보트의 안정적인 동적 거동을 확보할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

다만 본 연구에서는 실제 해상 환경에서 발생할 수 있는 파랑, 바람 및 비선형 유체-구조 상호작용을 충분히 반영되지 못하는 한계가 있다.

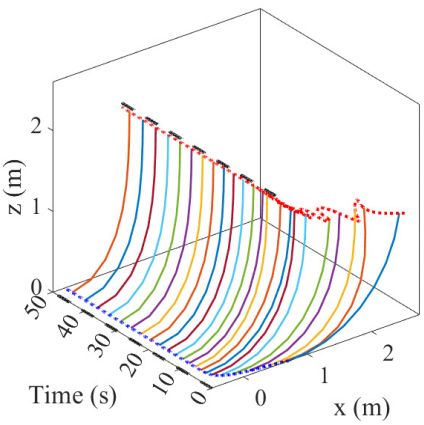

Fig. 5 Behaviors of the flexible hose under flying conditions

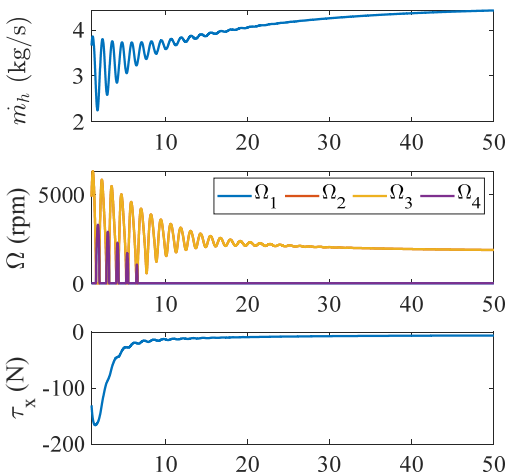

Fig. 6 Boundary control inputs

따라서 제안된 제어기의 성능을 실환경에서 검증하기 위해서는 후속 연구를 통한 실험적 검증이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 드론과 보트를 유연한 호스로 연결한 계류형 수공중 시스템을 제안하고 그 수학적 모델을 구하였다. 이것은 해상화재 등에 효과적으로 대응하기 위한 것으로, 일종의 자율운항 및 방재 능력을 갖춘 독립적인 무인 운용 시스템의 하나이다. 특히 드론과 보트로 구성된 시스템의 효율적이고 안정적인 방재 작업수행을 위해 경계 제어기를 설계하였다. 그리고 호스가 비선형 유연체 특성을 갖기 때문에, 경계에서 제어입력을 반영하여 편미분 및 상미분 방정식 형태로 모델링하였다. 제어계는 호스의 경계 운동과 변형을 고려하여 전체 시스템의 안정성과 바람직한 운동특성을 확보할 수 있도록 설계되었으며, 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증하였다.

향후에는 새로운 Lyapunov 함수를 바탕으로 한 고급 제어기법의 적용을 통해 현재의 한계를 극복하고, 실제 프로토타입 제작 및 실험을 통해 추가적인 검증을 수행할 예정이다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (No.2022R1A2C1003486) and under Project BK21 FOUR (Smart Convergence and Application Education Research Center).

Author contributions

Y. B. Kim; Conceptualization. H. Thinh; Supervision. H. Thinh; Formal analysis. J. S. Park; Writing-original draft. J. S. Park; Writing-review & editing. J. S. Park; Methodology. H. Thinh; Investigation. Y. B. Kim; Funding acquisition. H. Thinh; Software. J. S. Park; Data curation. Y. B. Kim; Validation.

References

1. Skyquest, n.d., “Drone Market Size, Share, and Growth Analysis”, Skyquest, Retrieved from: https://www.skyquestt.com/report/drone-market (Accessed: May. 30, 2025).
2. YouTube, 2022, “Drone Could Help Firefighters by Putting Out Fires”, YouTube, Retrieved from: https://www.youtube.com/watch?v=Bm2BVTTir4c (Accessed: Sep. 21, 2022).
3. K. Herrick, 2000, “Development of the Unmanned Aerial Vehicle Market: Forecasts and Trends”, Air & Space Europe, 2(2), 25-27. (http://dx.doi.org/10.1016/S1290-0958(00)80035-0)
4. D. Tal and J. Altschuld, 2021, Drone Technology in Architecture, Engineering and Construction, Wiley.
5. S. Bouabdallah and R. Siegwart, 2007, “Full Control of a Quadrotor”, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 153-158. (DOI:10.1109/IROS.2007.4399042)
6. M. Pascual and D. R. Andrea, 2017, Advanced UAV Aerodynamics, Flight Stability and Control, Wiley.
7. X. Liu and H. Zhou, 2019, “Unmanned Water-Powered Aerial Vehicles: Theory and Experiments”, IEEE Access, 7, 15349-15356. (DOI:10.1109/ACCESS.2019.2895335)
8. T. Huynh, D. H. Lee and Y. B. Kim, 2023, “Study on Actuator Performance Evaluation of Aerial Water-Powered System for Firefighting Applications”, Applied Sciences, 13(3), 1965. (https://doi.org/10.3390/app13031965)
9. H. Ando, Y. Ambe, A. Ishii, M. Konyo, K. Tadakuma, S. Maruyama and S. Tadokoro, 2018, “Aerial Hose Type Robot by Water Jet for Fire Fighting”, IEEE Robotics and Automation Letters, 3(2), 1128-1135. (DOI:10.1109/LRA.2018.2792701)
10. T. Huynh, C. T. Dinh and Y. B. Kim, 2023, “Observer-Based Boundary Control of a Water-Powered Aerial System”, Proceedings of the 2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 224-229. (DOI:10.1109/ICSSE58758.2023.10227193)
11. C. T. Dinh, T. Huynh and Y. B. Kim, 2022, “LQI Control System Design with GA Approach for Flying-Type Firefighting Robot Using Waterpower and Weight-Shifting Mechanism”, Applied Sciences, 12(18), 9334. (https://doi.org/10.3390/app12189334)
12. Y. Ambe, H. Ando, M. Konyo and S. Tadokoro, 2017, “Design of a Simple Controller for the Flying Hose Type Robot with Water Jet”, Proceedings of the JSME Annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), 2017, 1P1-P02. (DOI:10.1299/jsmermd.2017.1P1-P02)
13. M. P. Paidoussis, 1998, Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow, 1, Academic Press.
14. W. Chen, H. Dai and L. Wang, 2021, “Three-Dimensional Dynamical Model for Cantilevered Pipes Conveying Fluid under Large Deformation”, Journal of Fluids and Structures, 105, 103329. (https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2021.103329)
15. S. S. Ge, W. He, B. V. E. How and Y. S. Choo, 2010, “Boundary Control of a Coupled Nonlinear Flexible Marine Riser”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 18(5), 1080-1091. (DOI:10.1109/TCST.2009.2033574)
16. W. He, X. He and S. S. Ge, 2015, “Modeling and Vibration Control of a Coupled Vessel-Mooring-Riser System”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20(6), 2832-2840. (DOI:10.1109/TMECH.2015.2396034)
17. J. J. Leader, 2022, Numerical Analysis and Scientific Computation, CRC Press.