

워터제트 액추에이터를 갖는 플라잉타입 소화장치의 운동특성 분석과 모델링에 관한 연구

A Study on Motion Characteristics of a Flying-type Firefighting System with Water Jet Propulsion and Flow-regulating Actuators

딘카오트리* · 이동훈** · 김영복*†

Cao Tri Dinh*, Dong-Hun Lee** and Young-Bok Kim*†

(Received 26 May 2023, Revision received 22 June 2023, Accepted 23 June 2023)

초록 : 본 논문에서는 자율 화재진압 작업을 수행할 수 있는 비행형 화재진압 시스템을 제시하였다. 특히, 수역 중심이라 가장자리에서 운용할 수 있는 시스템을 고려한다. 이러한 영역에서 발생한 화재는 화재진압 인력뿐 아니라 일반적인 로봇 역시 진압 작업을 수행하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 네 개의 노즐과 워터제트 추진기를 이용한 비행형 화재진압 장치를 제안하였다. 각 노즐은 전동식 유량제어 밸브를 이용하여 질량유량을 조절하게 되고 결국 화재진압 장치의 모션제어를 수행할 수 있게 된다. 먼저, 수학적 모델을 도출하고 이에 대한 운동특성 해석을 수행한다. 제안하는 시스템은 비선형성, under-actuated, non-holonomic 특성을 갖고 물 공급 호스로부터 상당한 힘을 받는 시스템인 것으로 확인하였다. 그리고 간단한 피드백 제어를 설계하여 안정성 해석, 비행성능 평가를 통해 제안하는 시스템의 유효성을 검증하였다.

키워드 : 비행형 로봇시스템, 화재진압 장치, 유량제어 액추에이터, 동역학 모델링, 워터제트 추진

Abstract : In this study, we propose a novel aerial firefighting system that aims for autonomous firefighting missions in the body or border of water areas. In such areas, it is difficult and even dangerous for human firefighters as well as firefighting robots to approach and put out the fire. In the proposed system, four nozzles jet high-speed water flow for propelling and three motorized valves regulate the flow rate among the nozzle for maneuvering. Mathematical models reveal that the system is nonlinear, under-actuated, non-holonomic, and significantly affected by the motion of the water-conveying hose. Moreover, conditions for stability are analyzed and simulation studies with a simple feedback controller validate the maneuverability of the system.

Key Words : Aerial System, Firefighting System, Flow-regulating Actuator, System Modeling, Water Jet Propulsion

*† 김영복(<https://orcid.org/0000-0001-6035-6744>) : 교수, 부경대학교 지능로봇공학과

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6191

*딘카오트리(<https://orcid.org/0000-0002-1264-9734>) : 대학원생, 부경대학교 지능로봇공학과

**이동훈(<https://orcid.org/0000-0001-6157-9763>) : 조교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

*† Young-Bok Kim(<https://orcid.org/0000-0002-1264-9734>) : Professor, Department of Intelligent Robot Engineering, Pukyong National University.

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197

*Cao Tri Dinh(<https://orcid.org/0000-0002-1264-9734>) : Graduate student, Department of Intelligent Robot Engineering, Pukyong National University.

**Dong-Hun Lee(<https://orcid.org/0000-0001-6157-9763>) : Assistant Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

1. 서 론

해상·육상 상관없이 위험한 환경에서 작업의 효율성과 안정성을 확보하기 위해 원격조종 가능한 도구나 장치를 도입하는 것은 당연하다. 특히, 위험물질이 존재하는 환경 및 화재상황에 인력을 동원하는 것은 위험하고 그러한 환경에 노출되는 것만으로도 심각한 인적 및 물적피해를 초래하게 된다. 따라서 이러한 환경에는 인력 투입을 배제할 수 있는 원격조종시스템을 도입하는 것이 바람직할 것이다. 지금까지 개발된 기술로는 원격으로 조종되는 소형 차량형식의 로봇과 드론기술을 응용한 비행하는 소화수 분사장치 등이 있다.¹⁻¹⁰⁾

그래서 본 연구에서는 화재현장에서 원격조종으로 화재진압이 가능한 시스템을 제안하고 운동 특성 분석과 평가를 통해 제안하는 시스템의 유효성을 검증하도록 한다.

실제 화재 현장에서는 발화지점이나 화염이 존재하는 영역 근접한 곳에서의 소화작업은 어렵기 때문에 적당한 거리를 두고 물을 분사하는 방식으로 진화작업을 수행한다. 이것은 물을 직선적이고 맹목적으로 쏟아붓는 방법이다. 그러다 보니 조기진압이라기보다는 일정수준으로 화재상태를 안정화 시킨다는 표현이 적절할 것이다. 그래서 본 연구에서는, 원격조종을 통해 발화지점 가까이 접근하여 조기진압이 가능한 화재진압 시스템을 제안한다. 기본구조는, 비행이 가능한 소화수 분사부, 소화수 공급호수로 구성된다. 특히 소화수 분사부는 워터제트 방식으로 비행이 가능한 구조로 설계하였다. 비행방식으로 프로펠러방식이 아닌 워터제트 방식을 채택한 것은 발화지점 혹은 화재발생지점으로 근접해야 할 경우, 프로펠러 운전으로 발생하는 바람은 화재상황을 악화시키는 결과를 초래하게 될 것이다. 이러한 점을 고려하여 워터제트 방식으로 비행하는 시스템을 고안하게 되었다. 바람을 일으키는 방식이 아니므로 화재를 확산시킬 염려가 없다. 또한 Fig. 1과 같이 교통체증이 심한 교량 위 화재나, 선박화재의 경우에는 조기진압이 어렵다. 이러한 경우에는 소형 수상정 형식으로 구성하면 신속하게 출동하여 조



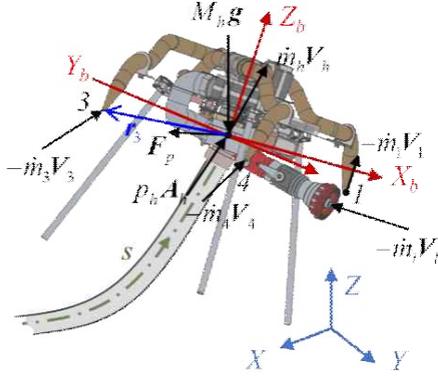
Fig. 1 Fire events in water areas

기진압이 가능하게 된다. 실제, 소형 수상정으로 이동하여 교량 위에서 발생한 화재를 진압하는 시스템이 개발되어 운용되고 있다.^{11,12)} 이 방식은 이동성은 좋으나, 위험한 조건에서 소방수가 직접 소화수를 분사하는 방식으로 소화작업을 수행해야 한다.

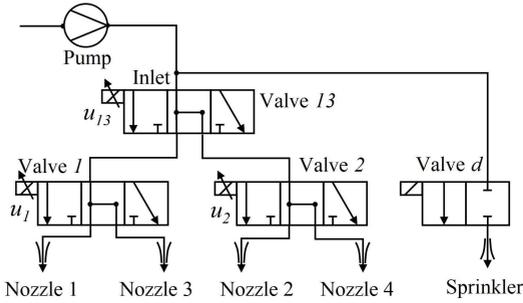
보다 진화된 기술로는 C. Viegas 등이 제안한 방식 등이 있다.¹²⁻¹⁶⁾ 이러한 기술도 소화장치가 이동하도록 설계되어 있으나, 조종성이 지극히 떨어져 이동 로봇형 소화장치로서의 자율성을 확보했다 하기 어려운 수준이다. 그래서 본 연구에서는, 분사노즐을 통해 유출되는 유량을 제어하여 비행운동을 제어하는 방법을 제안한다. 시스템 모델링과 안정성 분석과 함께 제어기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하도록 한다.

2. 장치구성과 모델링

본 연구에서 제안하는 비행형 소화장치는 Fig. 2에 나타낸 것과 같다. 기본적으로는 소화수 공급용 호스, 소화수를 분사하는 부분과 비행운동을 제어하는 제어수 조절부로 구성된다. 우선, 소화수는 항상 일정한 양이 분사되도록 하고, 운동을 제어하기 위한 제어수는 밸브 개폐각 조절을 조절함으로써 변화하는 질량유량에 따라 추력을 제어하는 방식을 고려하고 있다. 이때 비행운동 제어용 밸브는 4개로 방사형으로 배치하여 각각을 독립적으로 조절하여 운동을 제어한다. 시스템 모델링을 위해서, 두 개의 카르테시안 좌표계와 곡선좌표계를 도입한다. 이것은 공급수 호스 및 비행부 운동특성을 표현하기 위해서이다.



(a) Design of the proposed system



(b) Circuit diagram of water flow

Fig. 2 Proposed firefighting system using water jet propulsion and flow-regulating actuators

두 개의 카테시안 좌표계 중 하나는 지구고정좌표계(\$XYZ\$)와 물체고정좌표계(\$X_b Y_b Z_b\$)이다. 그리고 곡선좌표계 출발점은 공급수 펌프 출구지점으로 가정하고, 공급수 호스 중심선을 따라 비행체 헤드부까지 이어진다. 이것은 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같으며, 소화수 분사로 발생하는 반발력도 고려하여 그림에 표현하였다.

기준좌표에서, 임의 시각 \$t\$, 이때의 좌표 \$s\$에서의 호스 질점에 대한 부분벡터를 $\mathbf{X}(s,t) = [X(s,t) Y(s,t) Z(s,t)]^T$ 로 나타내면, 호스 입구측, 즉 펌프 출구측에서는 $\mathbf{X}(0,t)$, 헤드부에 연결되는 지점에서는 $\mathbf{X}(L,t)$ (호스 전체길이를 \$L\$)와 같이 표현된다. 이것으로부터 호스를 통해 이동하는 질량유량은 다음 식으로 표현된다.

$$\mathbf{V}_f(s,t) = \dot{\mathbf{X}}(s,t) + \mathbf{V}_h(t)\mathbf{X}'(s,t) \quad (1)$$

여기서, $\dot{\mathbf{X}}(s,t)$ 는 호스 질점 속도, $\mathbf{X}'(s,t)$ 는 좌표 \$s\$에 대한 미분을 의미하며, $V_h(t)$ 축질량유량을 나타낸다.

결과적으로, 비행하는 헤드부의 운동은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}(L,t) \\ \dot{\boldsymbol{\varphi}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_E^b(t) & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{R}_{Euler}^b(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_b(t) \\ \boldsymbol{\omega}_b(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$\mathbf{v}_b(t) = [v_{xb}(t) v_{yb}(t) v_{zb}(t)]^T$: 물체고정좌표에 대한 병진속도벡터

$\boldsymbol{\varphi}(t) = [\phi(t) \theta(t) \psi(t)]^T$: 오일러 각도 벡터

$\boldsymbol{\omega}_b(t) = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T$: 각속도 벡터

$\mathbf{R}_E^b(t)$: 헤드부 고정좌표를 기준좌표로 변환하는 회전행렬

$\mathbf{R}_{Euler}^b(t)$: 각속도를 오일러 각속도로 변환하는 변환행렬

그리고 헤드부에서, 유량이 유입되고 유출되는 위치에서의 질량유량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{V}_{jb}(t) = V_j(t)\hat{\mathbf{n}}_{jb}(t) + \boldsymbol{\omega}_b(t) \times \mathbf{r}_{jb} + \mathbf{v}_b(t) \quad (3)$$

여기서 $j = h, l, i(i=1, \dots, 4)$ 는 헤드부 유입구, 소화수 유출부, 4개의 비행운동 제어용 노즐의 유출구를 각각 나타낸다. 그리고 하첨자 두 번째 \$b\$ 물체고정좌표계를 의미하며, \mathbf{r}_{jb} 는 유입 및 유출구의 위치벡터, $\hat{\mathbf{n}}_{jb}$ 는 해당 단면적에 대한 단위길이 법선벡터를 나타낸다.

2.1 유체가 흐르는 호스 모델링

비행하는 소화장치는 연결된 호스를 통해 소화수와 운동제어를 위한 제어수가 공급된다. 즉, 헤드부는 호스와 연결된 상태에서 이동하기 때문에 연결된 호스의 운동에 따라 헤드부 운동도 영향을 받을 수밖에 없다. 따라서 호스부의 동적특성도 시스템 모델링에 반드시 포함되어야 한다. 그래서 유체이동이 있는 호스에 대한 수정된 헤일턴원리는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \delta W_h(t) dt + \delta \int_{t_1}^{t_2} L_h(t) dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} [m_f V_h(\dot{\mathbf{X}}(L,t) + V_h(t) \mathbf{X}'(L,t))] dt \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, δ 는 해밀턴 연산자이며, 우항은 호스 끝단에서 열린 표면을 지나는 virtual momentum transport(가상 이송 운동량)이다. $\delta W_h(t)$ 는 호스에 작용하는 외력에 의한 가상일을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \delta W_h &= \int_0^L \mathbf{F}(s,t)^T \delta \mathbf{X}_\Delta(s,t) ds, \\ \mathbf{X}_\Delta(s,t) &= \mathbf{X}(s,t) - \mathbf{X}(s,0), \\ \mathbf{F}(s,t) &= -\boldsymbol{\mu}_s \dot{\mathbf{X}}(s,t) + \mathbf{F}_r(s,t) \delta_{(Z(s,t))} \\ &\quad - \mathbf{F}_p(t) \delta_{(s-L)} + \mathbf{F}_0(t) \delta_{(s)} \\ &\quad - p_h A_h \hat{\mathbf{n}}_h(t) \delta_{(s-L)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $-\boldsymbol{\mu}_s \dot{\mathbf{X}}(s,t)$ 는 호스의 댐핑특성이다. ($\boldsymbol{\mu}_s$ 는 양의 정정행렬) \mathbf{F}_p 는 헤드부 반발력, \mathbf{F}_o 는 호스부 끝단에 작용하는 전체 힘을 나타낸다.

편의상, 견인력, 바람, 지면효과 등등은 무시한다. 따라서 \mathbf{F}_r 에는 운동환경에 따라 접촉력, 부력, 유체력 및 해저 상관력 등이 고려될 수 있다. 그리고 $p_h A_h$ 는 호스 출구측 토출압력에 기인되는 힘을 나타낸다.

식 (4)에서 두 번째 항은 라그랑지안이고, 이것은 호스의 굽힘 스트레인(B)과 중력(G)의 영향으로 만들어지는 Kinetic 에너지와 Potential 에너지가 포함된다. 즉,

$$L_s(t) = T(t) - B(t) - G(t) \quad (6)$$

와 같고, 보다 상세하게는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{1}{2} m_p \int_0^L \dot{\mathbf{X}}(s,t)^T \dot{\mathbf{X}}(s,t) ds \\ &\quad + \frac{1}{2} m_f \int_0^L \mathbf{V}_f(s,t)^T \mathbf{V}_f(s,t) ds, \\ B(t) &= \frac{1}{2} EI \int_0^L \mathbf{X}''(s,t)^T \mathbf{X}''(s,t) ds, \\ G(s,t) &= (m_p + m_f) g \int_0^L Z(s,t) ds \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, m_p , m_f 는 각각 단위 길이당 호스질량 및 유체질량을 나타낸다. 여기서, EI 는 호스의 굽곡강성을 의미한다.

또한 호스를 통과하는 질량 질량유량 $\dot{m}_h(t)$ 로부터 다음 식의 관계가 성립한다.

$$V_h(t) = \dot{m}_h(t) / \rho A_h, m_f = \rho A_h \quad (8)$$

이때 ρ 는 유체밀도, A_h 는 호스 단면적이다.

여기서, 식 (5)~(8)을 식 (4)에 대입하고, 가감속 성분을 무시하여 정리하면 유체가 이동하는 호스에 대한 지배방정식은 다음 식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} (m_p + \rho A_h) \ddot{\mathbf{X}}(s,t) &= -\boldsymbol{\mu}_s \dot{\mathbf{X}}(s,t) \\ &\quad - \dot{m}_h^2(t) \mathbf{X}''(s,t) / \rho A_h \\ &\quad - 2\dot{m}_h(t) \dot{\mathbf{X}}'(s,t) - EI \mathbf{X}''''(s,t) \\ &\quad + \mathbf{F}_r(s,t) \delta_{(Z)} + (m_p + \rho A_h) \mathbf{g} \end{aligned} \quad (9)$$

이때 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_p(t) + p_h A_h \hat{\mathbf{n}}_h(t) - EI \mathbf{X}''''(L,t) &= 0, \\ -\mathbf{F}_0(t) + m_f V_h(t) \dot{\mathbf{X}}(0,t) + EI \mathbf{X}''''(0,t) &= 0, \\ \mathbf{X}'(L,t) = 0, \mathbf{X}'(0,t) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 헤드부 모델링

모델링을 위해 소화수 살수부 및 모선제어를 위한 노즐이 장착된 헤드부는 강체라 가정한다. 따라서 뉴턴-오일러 공식으로부터 헤드부의 동특성은 다음 식으로 구해진다.

$$\begin{aligned} M_h(\dot{\mathbf{v}}_b(t) + \boldsymbol{\omega}_b(t) \times \mathbf{v}_b(t)) \\ = \mathbf{F}_{hb}(t) + M_h \mathbf{g}_b + p_h A_h \hat{\mathbf{n}}_{nb}(t) + \mathbf{F}_{pb}(t), \\ J_h \dot{\boldsymbol{\omega}}_b(t) + \boldsymbol{\omega}_b(t) \times J_h \boldsymbol{\omega}_b(t) \boldsymbol{\tau}_{hb}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

이때 M_h 는 내부 유체질량을 포함한 헤드부 전체 질량을 의미하며, J_h 는 헤드부의 관성행렬이다. 또한

$\mathbf{F}_{hb}(t)$ 는 헤드 내부부를 통해 흐르는 유체의 유동특성변화에 따라 헤드부에 작용하는 모든 힘,

$p_h A_h \hat{\mathbf{n}}_{hb}(t)$ 는 헤드부 소화수 유입단에 작용하는 유압을 나타낸다.

또한 $\mathbf{F}_{pb}(t)$ 는 제어수 노즐로 분사되는 유량에 의한 추력이 헤드부에 전달되는 영향력을 의미하며, 이때의 발생토크와 함께 다음 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{hb}(t) &= -\sum_{i=1}^4 \dot{m}_i(t) \mathbf{V}_{ib}(t) - \dot{m}_l(t) \mathbf{V}_{lb}(t) \\ &\quad + \dot{m}_h(t) \mathbf{V}_{hb}(t), \\ \boldsymbol{\tau}_{hb}(t) &= -\sum_{i=1}^4 \mathbf{r}_{ib} \times \dot{m}_i(t) \mathbf{V}_{ib}(t) - \mathbf{r}_{lb} \times \dot{m}_l(t) \mathbf{V}_{lb}(t) \\ &\quad + \mathbf{r}_{hb} \times \dot{m}_h(t) \mathbf{V}_{hb}(t)\end{aligned}\quad (12)$$

여기서, \dot{m}_i 는 운동제어용 4개의 노즐을 통해 분사되는 유체의 질량유량, $\dot{m}_l, \dot{\mathbf{V}}_l$ 는 소화수 노즐을 통해 빠져나가는 소화수 질량유량과 속도를 나타낸다.

Fig. 2에 나타난 것과 같이, 소화수 및 제어수 조절을 위해 3-way 밸브를 이용하며, 유량제어를 위해 맵핑변수를 $u_j \in [-1, 1]$ ($j=1,2,3$)와 같이 정의한다. 즉, u_j 는 j 번째 밸브의 노즐 동작상태를 의미한다. 예를 들어 $u_j = 0$ 는 밸브가 중립상태에 있으며, 1(혹은 -1)은 밸브 좌측(우측) 토출구가 완전히 열린다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 비례제어식 밸브로 제어수를 조절하는 방법을 고려하고 있다.

따라서 유량의 연속방정식으로부터 다음 식이 구해진다.

$$\begin{aligned}\dot{m}_1(t) &= (1+u_1(t))(1+u_{13}(t))(\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))/4, \\ \dot{m}_3(t) &= (1-u_2(t))(1+u_{13}(t))(\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))/4, \\ \dot{m}_2(t) &= (1+u_2(t))(1-u_{13}(t))(\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))/4, \\ \dot{m}_4(t) &= (1-u_2(t))(1-u_{13}(t))(\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))/4\end{aligned}\quad (13)$$

여기서, 식 (12), 식 (13), 경계조건 식 (10) 및 kinematics 식 (1)을 식 (11)에 대입하고, 고차항 등을 무시하여 정리하면 헤드부 운동특성을 표현하기 위한 수식모델은 다음 식으로 구해진다.

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{X}}(L,t) &= \frac{1}{M_h} \mathbf{R}_E^b(t) \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{s_\delta}{(wc_\delta - hs_\delta)} U_Y(t) \\ U_Z(t) \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{\rho A_l} \begin{bmatrix} -c_{\delta_l} \\ 0 \\ s_{\delta_l} \end{bmatrix} \dot{m}_l^2(t) + h(\dot{m}_h - \dot{m}_l) \begin{bmatrix} -100 \\ 0 & 10 \\ 0 & 00 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{Euler}^{-1}(t) \dot{\boldsymbol{\varphi}}(t) \\ &\quad + \mathbf{g} + \frac{1}{M_h} \frac{\dot{m}_h^2(t)}{\rho A_n} \hat{\mathbf{n}}_h(t) + \frac{1}{M_h} EI \mathbf{X}'''(L,t) + \mathbf{d}_X(t), \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}(t) &= \mathbf{R}_{Euler}(t) \mathbf{J}_h^{-1} \begin{bmatrix} U_Y(t) \\ -U_X(t) \\ -U_\psi(t) \end{bmatrix} + \frac{h_l c_{\delta_l} - l_1 s_{\delta_l}}{\rho A_l} \dot{m}_l^2(t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &\quad + \dot{\mathbf{R}}_{Euler}(t) \boldsymbol{\omega}_b(t) + \mathbf{d}_\varphi(t)\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}U_X(t) &= \frac{lc_\delta}{4A_n \rho} (\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))^2 (u_1(t) - u_2(t)), \\ U_Y(t) &= \frac{wc_\delta - hs_\delta}{4A_n \rho} (\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))^2 (u_1(t) + u_2(t)), \\ U_Z(t) &= \frac{c_\delta}{4A_n \rho} (\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))^2, \\ U_\psi(t) &= \frac{ls_\delta}{2A_n \rho} (\dot{m}_h(t) - \dot{m}_l(t))^2 u_{13}(t)\end{aligned}\quad (15)$$

위 식에서, 첨자 l, w, h 는 각각 종방향, 횡방향, 수직방향을 의미하며, δ 는 모션제어용 노즐과 수직축이 이루는 예각이다. 그리고 δ_l 소화수 노즐과 종축 X_b 사이의 각도이다. 마지막으로 $\mathbf{d}_X(t), \mathbf{d}_\varphi(t)$ 는 외란, 고차항을 비롯하여 헤드부 운동에 영향을 미치는 기타 요소들이다.

3. 운동특성해석

위에서 도출한 수학적 모델로부터 시스템의 특성을 추론할 수 있다. 첫 번째로, 제어대상 시스템은 non-holonomic 조건을 갖는다. 즉, 소화수 공급용 호스는 늘어나지 않는다고 가정한다. 따라서 다음 식의 조건이 성립한다면, 식 (9)에 나타난

$$\begin{aligned}\mathbf{X}'(s,t)^T \mathbf{X}'(s,t) &= 1, \text{or} \\ \frac{d}{dt} (\mathbf{X}'(s,t)^T \mathbf{X}'(s,t)) &= 0\end{aligned}\quad (16)$$

호스의 3차원 운동특성은 두 개의 부분 운동으로 나타낼 수 있다.

이러한 조건은 호스의 운동에 제약을 가하고, 임의의 상태에서 원상태로 복귀하는 것을 막는 결과를 가져온다.

두 번째로, 제어대상은 under-actuated 시스템이다. 즉, 제어입력수는 4개인 반면, 헤드부는 6자유도 운동을 한다. 여기서 호스의 요소는 적절한 수만큼 설정하여 계산상 부담이 발생하지 않도록 한다. 즉, 본 연구에서는 헤드부의 운동제어가 주된 목적이기 때문에, 호스부의 운동은 헤드부 운동에는 하나의 외란으로 간주한다.

세 번째, 비행환경이 육상이라면, F_r 에는 지면에 대한 수직접촉력과, 호스가 지면과 접촉할 때 발생하는 마찰력이 포함된다. 만일 해상환경이라면, 부력과 유체동력 및 해저면과의 상호작용력이 포함되게 된다.

마지막으로, 호스 운동 안정성은 호스 내를 통해 흐르는 질량유량에 의해 결정된다. 무한차분법에 따라 $s_n = n\Delta s$ ($n=1,2,\dots,N_s$, $\Delta s = L/N_s$)라 둔다. 그리고 차분연산자를 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}'(s_n, t) &\approx \frac{\mathbf{X}(s_n, t) - \mathbf{X}(s_{n-1}, t)}{\Delta s}, \\ \mathbf{X}''(s_n, t) &\approx \frac{\mathbf{X}(s_{n+1}, t) - 2\mathbf{X}(s_n, t) + \mathbf{X}(s_{n-1}, t)}{\Delta s^2}, \\ \mathbf{X}'''(s_n, t) &\approx \frac{1}{\Delta s^4} (\mathbf{X}(s_{n+2}, t) - 4\mathbf{X}(s_{n+1}, t) \\ &\quad + 6\mathbf{X}(s_n, t) - 4\mathbf{X}(s_{n-1}, t) + \mathbf{X}(s_{n-2}, t)) \end{aligned} \quad (17)$$

이때, 식 (9)의 지배방정식을 이산화하고 선형화하면 다음 식이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_s(t) \\ \dot{\mathbf{X}}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3N_s} & \mathbf{I}_{3N_s} \\ \mathbf{A}_{s1} & \mathbf{A}_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_s(t) \\ \dot{\mathbf{X}}_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3N_s \times 1} \\ \mathbf{D}_s(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

아래에서, \mathbf{I}_n 는 n 차원 단위행렬, $\mathbf{0}_{i \times j}$ 는 적당한 차원의 영행렬을 의미한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_s(t) &= [\mathbf{X}^T(s_1, t) \ \mathbf{X}^T(s_2, t) \ \dots \ \mathbf{X}^T(s_{N_s}, t)]^T, \\ \mathbf{A}_{s1} &= \begin{bmatrix} -\sigma_3 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_1 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_3 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_1 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ -\sigma_1 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_3 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_1 \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & -\sigma_1 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_3 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & -\sigma_1 \mathbf{I}_3 & \sigma_2 \mathbf{I}_3 & -\sigma_3 \mathbf{I}_3 \\ & & \dots & & \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_{s2} &= \begin{bmatrix} -\sigma_4 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \sigma_4 \mathbf{I}_3 & -\sigma_4 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \sigma_4 \mathbf{I}_3 & -\sigma_4 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \sigma_4 \mathbf{I}_3 & -\sigma_4 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \sigma_4 \mathbf{I}_3 & -\sigma_4 \mathbf{I}_3 \\ & & \dots & & \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{D}_s(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{g} + \mathbf{F}_r(s_1, t) \delta_{(z_{s2})} / (m_p + m_f) \\ \mathbf{g} + \mathbf{F}_r(s_2, t) \delta_{(z_{s2})} / (m_p + m_f) \\ \vdots \\ \mathbf{g} + \mathbf{F}_r(s_{N_s}, t) \delta_{(z_{s2})} / (m_p + m_f) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{EI}{(m_f + m_p) \Delta s^4}, \\ \sigma_2 &= \frac{1}{(m_f + m_p)} \left(\frac{4EI}{\Delta s^4} - \frac{m_f V_h^2}{\Delta s^2} \right), \\ \sigma_3 &= \frac{1}{(m_f + m_p)} \left(\frac{6EI}{\Delta s^4} + \frac{2m_f V_h^2}{\Delta s^2} \right), \\ \sigma_4 &= \frac{2m_f V_h}{(m_f + m_p) \Delta s} \end{aligned}$$

위에서 설명한 것과 같이, 호스의 운동 안정성은 호스 내부를 따라 흐르는 질량유량에 의해 결정된다. 예를 들어 질량유량이 일정수준 이하가 되면 헤드부는 하강하게 되고, 아울러 호스도 지면으로 처져 안정한 운동을 하게 된다.

반대로 질량유량이 임계속도 이상이 되면 호스가 떨리는 현상 등이 발생하여 불안정한 운동을 하게 될 것이다.

이것은 외팔보 파이프에서 나타나는 유사한 특성이다.

4. 시뮬레이션 결과

4장에서는 제어대상의 운동특성을 분석하고 제어성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행한다.

먼저, 제어대상에 대한 규격 등은 Table 1에 정

Table 1 Specifications of the firefighting system

Parameter	Value	Unit
Mass : M_h	3.1	kg
Inertia matrix : J_h	$10^{-3} \begin{bmatrix} 35 & -1 & -1 \\ -1 & 34 & -1 \\ -3 & -1 & 34 \end{bmatrix}$	kg·m ²
Dimensions : l, w, h	0.12, 0.23-0.03	m
Incline of nozzles : σ	$\pi/6$	rad
Cross area of hose : A_h	1962.5	mm ²
Cross area of nozzles' outlet : A_n	12.6	mm ²
Critical flow rate : \dot{m}_{hc}	7.5	kg/s
Hose's stiffness : EI/L	2.865	Nm/rad
Hose's damping : μ_s	0.287	Nms/rad
Water density : ρ	1000	kg/m ³

리하였다. 조종성능을 평가하기 위해 피드백 제어를 설계하고 펌프와 밸브의 적절한 제어를 통해 비행체의 운동성능을 확보하도록 한다.

이때 제어기 이득은, 호스가 요동치는 등의 불안정한 현상이 발생하지 않도록 즉, 유량이 호스 임계값을 초과하지 않도록 선정한다. 제어기는 식 (20)과 같고 이것을 블록선도로 나타낸 것이 Fig. 3이며, 제어기 이득은 Table 2에 정리하였다.

본 시뮬레이션에서는 제어대상 비행체가 육상 환경에서 운용된다고 가정한다. 즉, 지면에 대한 수직접촉력, 호스와 지면과의 마찰력이 고려된다.

$$\begin{aligned}
 U(t) &= -K_f X(t) + K_g e(t) + [\dot{m}_l(t) \mathbf{O}_{1 \times 3}]^T \quad (20) \\
 U(t) &= [\dot{m}_h(t) \ u_{13}(t) \ u_{14}(t) \ u_{12}(t)]^T, \\
 X(t) &= [X^T(L,t) \ \varphi^T(t) \ \dot{X}_b^T(L,t) \ \omega_b^T(t)]^T, \\
 \dot{e}(t) &= X_d(t) - [X^T(L,t) \ \psi(t)]^T, \\
 X_d(t) &= [X_d^T(L,t) \ \psi_d(t)]^T
 \end{aligned}$$

시뮬레이션 시나리오를 정리하면 다음과 같다.

첫 번째는, 화재발생 지점이 여러 곳이라 가정하고, 각 화재발생지점에서 소화작업을 이동하면서 수행하는 경우를 가정한 것이다.

두 번째는, 비행체가 설정된 경로를 이동하고, 장애물도 회피하면서 화재진화작업을 수행하는 경우를 고려한 것이다.

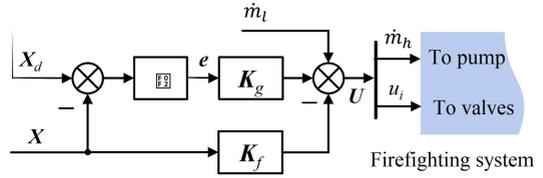


Fig. 3 Schematic drawing of the implemented controller

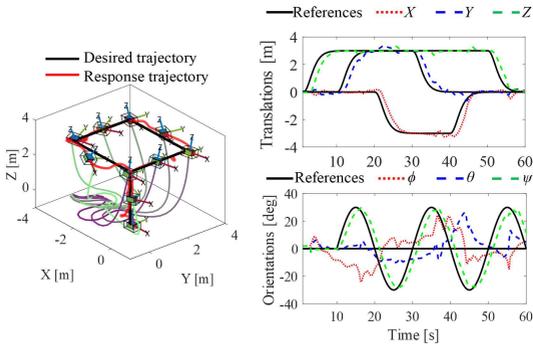
Table 2 Controller gains

Gain	Value
K_f	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 2.544 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.628 \\ -1.659 & -0.64 & 0 & 1.492 & -3.923 & 0 \\ 1.659 & -0.64 & 0 & 1.492 & 3.923 & 0 \\ 0 & 0 & 0.755 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.064 \\ -0.711 & -0.271 & 0 & 0.056 & -0.156 & 0 \\ 0.711 & -0.271 & 0 & 0.056 & 0.156 & 0 \end{bmatrix}$
K_g	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 2.113 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.48 \\ -1.264 & -0.488 & 0 & 0 \\ 1.264 & -0.488 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

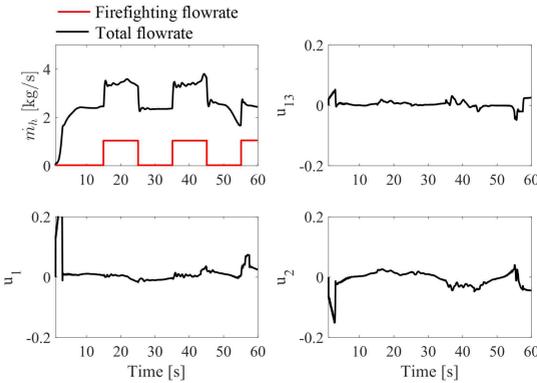
시뮬레이션은, 4개의 노즐을 적절히 조절하여 설정된 경로를 따라 이동하며, 이때 소화수 분사 노즐을 통해 화재진압을 위한 소화수도 분사된다. 이때 소화수는 질량유량 1 kg/s로 10 s 간격으로 분사노즐을 열고 닫는다. 이것은 소화수 분사가 비행체 운동에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다.

먼저, 4개의 발화지점을 순차적으로 이동하면서 진화작업을 수행하는 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

(a)의 좌측은 비행체 경로추종성능을 나타내고 있다. 즉, 지면에서 2 m 부상하여 시계방향으로 4 m씩 직선 이동하는 시뮬레이션 결과이다. 우측 위 그림은 비행체가 XYZ 좌표상에 설정된 경로를 따라 추종하는 형태를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 것과 같이, 비행 중에 그림 (b) 좌측 위와 같이 일정한 간격으로 소화수를 분사한다. 그 결과로 비행체에 반발력이 전달되어 비행체 운동에 영향을 미치게 된다. 이러한 현상은 (a) 우측 위 그림으로부터 알 수 있는데, 특히 이동 중 20 s



(a) Motion performance



(b) Control signals

Fig. 4 Simulation results of point-to-point tracking

지점에서 고도유지에 약간 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있으나, 반발력 영향을 보상하기 위한 제어력의 작용으로 정상상태로 잘 복귀하고 있다는 것을 알 수 있다.

그리고 우측 아래 그림은 이때의 비행체의 요우, 서지, 피치모션 제어성능을 나타낸다. 결과적으로, 소화수 분사에 따른 반발력의 작용에도 불구하고 설정된 경로를 잘 추종하여 우수한 운동 제어성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

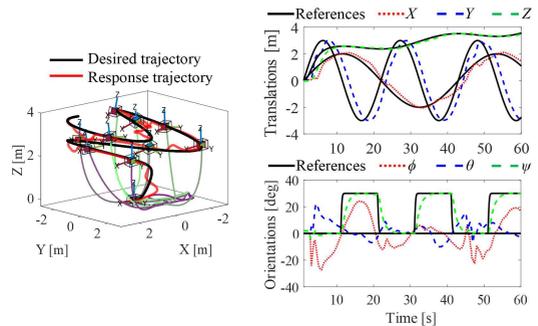
추가로, Fig. 4 (b)에서 좌측 위 그림은 소화수를 분사속도(붉은 점선)와 전체 공급수 질량유량(실선), 우측 위는 소화수 밸브 제어입력, 그리고 아래 두 그림은 4개의 제어수 밸브를 제어하기 위한 제어입력을 나타내고 있다.

두 번째 시뮬레이션 결과를 정리한다. 위에 소

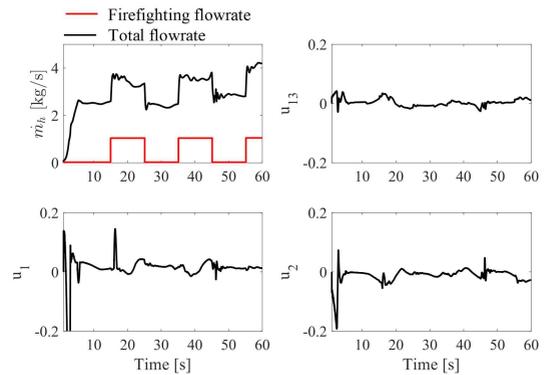
개한 첫 번째 시뮬레이션과 동일한 방법으로 진행하였다. 단, 비행체 이동경로를 임의의 곡선형태로 설정하였을 때의 비행체 추종성능(Fig. 5 (a)의 좌측), 3차원 좌표상에서의 비행체 위치((a)에서 우측 위)와 모션((a)의 우측 아래)을 확인하였다. 이동 중에 소화수를 분사함에 따라 발생하는 외란의 영향에도 불구하고 설정된 경로를 잘 추종하고 있다는 것을 알 수 있다.

그리고 Fig. 5 (b)는, 소화수 분사속도 및 전체 공급수 질량유량(좌측 위), 소화수 조절밸브 제어입력(우측 위), 4개의 운동제어용 제어밸브 제어입력(아래, u_1, u_2)를 각각 나타내고 있다.

위에 소개한 두 가지 시뮬레이션에서, 비행체 운동제어에 가장 큰 영향을 미치는 것은 소화수 분사에 따른 반발력이다. 여기에 더해 비행체가 끌고 다니는 호스이다. 호스에 대한 동특성을 수



(a) Motion performance



(b) Control signals

Fig. 5 Simulation results of the continuous tracking

식으로 표현하고 모델링하여 시뮬레이션과정에도 반영하였다. 비행체 운동범위가 제한적일 경우에는 큰 영향이 없는 것으로 평가되었으나, 보다 광범위한 영역을 이동해야 하는 경우에 호스의 이송을 도와 비행안정성을 확보하는 방법이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비행하는 형식의 화재 진압시스템을 제안하고, 수식모델을 구해 시스템의 운동특성을 분석하고 평가하였다. 수식모델의 신뢰성을 확보하기 위한 차원에서, 시스템의 운용환경과 조건, 비선형특성, 비홀로모믹특성 및 under-actuated라는 근원적인 문제까지 고려하였다. 도출한 모델에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 화재진압을 위해 비행체가 이동하는 과정 중에 발생하는 외란 특성, 즉 소화수 분사에 따른 반발력 및 호스로 인한 이동 방해요인 등도 충분히 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 결론적으로, 설정된 이동경로를 잘 추종하였으며, 외란의 영향도 적극적으로 보상하여 이동안정성과 우수한 경로추종성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다. 향후 실험장치를 통해 본 논문에서 제안하는 모델과 제어시스템의 유효성을 검증하고, 소방수 대체 화재진압 수단으로 활용하기 위한 실증 연구를 진행할 것이다.

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. C. T. Dinh; Data curation. D. H. Lee; Formal analysis. B. K. Kim;

Funding acquisition. D. H. Lee; Investigation. Y. B. Kim; Methodology. D. H. Lee; Project administration. C. T. Dinh; Resources. C. T. Dinh; Software. Y. B. Kim; Supervision. D. H. Lee; Validation. C. T. Dinh; Visualization. C. T. Dinh; Writing-original draft. D. H. Lee; Writing-review & editing.

References

1. Shark Robotics Colossus, Retrieved from: <https://www.shark-robotics.com/>. Accessed: 4 May 2023.
2. Howe & Howe Thermite, Retrieved from <https://www.howeandhowe.com/civil/thermite>. Accessed: 4 May 2023.
3. Angatec, TEC800 Firefighting Robot, Retrieved from: <https://www.angatec.com/en/tec800/>. Accessed: 4 May 2023.
4. Guofei UAV: TH series, Retrieved from: <http://www.guofei-uav.com/index.php?c=article&a=type&tid=43>. Accessed: 4 May 2023.
5. EHang, EHang 216F. Retrieved from: <https://www.chang.com/ehang216f/>, Accessed: 4 May 2023.
6. Aeronex, Drone Could Help Firefighters By Putting Out Fires, Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=Bm2BVTTir4c>. Accessed: 4 May 2023.
7. E. Ausonio, P. Bagnnerini and M. Ghio, 2021, "Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework", Drones, 5(1), 17. (<https://doi.org/10.3390/drones5010017>).
8. H. Qin, Q. Jin, J. Li, Y. Bi, M. Lan, M. Shan, W. Liu, K. Wang, F. Lin, Y. F. Zhang and M. Ben, 2016, "Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions", 12th IEEE International Conference on Control and Automation, 62-67. (<https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505253>)

9. D. A. Saikin, T. Baca, M. Gurtner and M. Saska, 2020, “Wildfire Fighting by Unmanned Aerial System Exploiting Its Time-Varying Mass”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2674-2681.
(<https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2972827>).
10. S. Vojtech, P. Vaclac, W. Viktor, P. Matej, B. Tomas, S. Petr, Z. David and S. Martin, 2021, “Autonomous Firefighting Inside Buildings by an Unmanned Aerial Vehicle”, *IEEE Access*, 9, 15872-15890.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052967>)
11. Civil defence force of Dubai: Dubai firefighters use jetpacks to aid high-speed response, Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=H1VIXUTzbII>. Accessed: 4 May 2023.
12. C. Viegas, B. Chehreh, J. Andrade and J. Lourenço, 2022, “Tethered UAV with Combined Multi-rotor and Water Jet Propulsion for Forest Fire Fighting”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 104(2), 21.
(<http://dx.doi.org/10.1007/s10846-021-01532-w>)
13. D. Chaikalis, A. Tzes and F. Khorrani, 2020, “Aerial Worker for Skyscraper Fire Fighting using a Water-Jetpack Inspired Approach”, 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems”, 1392-1397.
(<https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213936>)
14. H. Ando, A. Yuichi, L. Akihito, K. Masashi, T. Kenjiro, M. Shigenao and T. Satoshi, 2018, “Aerial Hose Type Robot by Water Jet for Fire Fighting”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(2), 1128-1135.
(<https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2792701>)
15. H. Ando, A. Yuichi, Y. Tomoka, Y. Yu, K. Masashi, T. Kenjiro, M. Shigenao and T. Satoshi, 2020, “Fire extinguishment using a 4 m long flying-hose-type robot with multiple water-jet nozzles”, *Advanced Robotics*, 34(11), 700-714.
(<https://doi.org/10.1080/01691864.2020.1769723>)
16. H. Ando, A. Yuichi, Y. Tomoka, K. Masashi, T. Kenjiro, M. Shigenao and T. Satoshi, 2019, “Fire Fighting Tactics with Aerial Hose-type Robot ‘Dragon Firefighter’”, 2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts, 291-297.
(<https://doi.org/10.1109/ARSO46408.2019.8948716>)