

화재진압용 비행형 소화수 살수장치 개발에 관한 연구: 운동제어시스템 설계

A Study on Development of Flying Type Fire Extinguisher with Water Jet System: Motion Control System Design

김영복* · 응엔탄녹* · 흰틴**†

Young-Bok Kim*, Tan-Ngoc Nguyen* and Thinh Huynh**†

(Received 23 September 2021, Revision received 17 October 2021, Accepted 18 October 2021)

Abstract : In this study, the control system design problem of a novel flying type fire fighting system (flying robot) is presented. A proposed system can provide very effective fire fighting such that the safety in work is occupied. The proposed fire fighting system is flying and approaching to the fire point as the target by using water source propulsion systems which consist of four water jet actuators. Controlling the propulsion forces made by actuators, the 6DOF motions of flying robot are controlled such that the system approaches to the target point. For this purpose, the authors design a control system for the flying robot. Two control schemes are provided for evaluating the control performances. The simulation results show the superiority and reliability of the proposed control system.

Key Words : Flying type, Flying robot, Fire fighting system, Safety, Water jet actuator

1. 서 론

본 논문에서는 화재발생위치까지 근접 이동하여 조기에 화재를 진압할 수 있는 비행이 가능한 소화수 살수장치 개발에 관한 연구결과를 소개한다. 현재는 화재발생지점의 상황파악 없이 단순히 소화수를 원거리에서 쏟아 붓는 방식으로 진압을

시도한다. 화재상황, 구조대상자 유무를 파악할 수 없는 상태에서 오로지 소화수로 상황을 진정시키는 것이 현재의 화재진압전략이라 할 수 있다. 더욱이, 직선적인 살수로는 시멘트 벽 등의 장애물 반대편까지 소화수가 도달하지 않기 때문에 화재를 조기에 억제할 수 없다. 예를 들어 철재선박 화재의 경우에는 소화수를 화재 발생 근원지

**† 흰틴(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7329-8432) : 교수, 호치민시립기술교육대학교, 자동차과
E-mail : huynhthinh@hcmute.edu.vn, Tel : 051-629-6197
*김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : 교수, 부경대학교 스마트로봇융합응용공학과
*응엔탄녹(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0097-6391) : 대학원생, 부경대학교 스마트로봇융합응용공학과

**† Thinh Huynh(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7329-8432) : Professor, Ho Chi Min City University of Technology and Education, Ho Chi Min City 700000, Vietnam.
E-mail : huynhthinh@hcmute.edu.vn, Tel : 051-629-6197
*Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : Professor, Department of Smart Robot Convergence and Application Engineering, Pukyong National University.
*Tan-Ngoc Nguyen(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0097-6391) : Graduate School Student, Department of Smart Robot Convergence and Application Engineering, Pukyong National University.

점까지 접근시키는 불가능하다.¹⁾

이러한 문제점을 개선하기 위한 대표적인 방법이 로봇기술의 도입이 될 수 있으나, 살수장치를 화재발생지점까지 근접시킬 수 있다는 것일 뿐 직선 살수방식의 단점을 근본적으로 개선할 수는 없다.²⁾ 또한 드론을 이용한 실내의 화재진압 시스템³⁻⁵⁾ 및 이를 위한 군집비행 기법^{6,7)} 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서 지상형 소방로봇은 바퀴구동방식이므로 화재현장의 상태에 영향을 받을 수밖에 없고, 특히 고층건물에는 화재진압을 시도하기까지 상당한 시간과 노력이 필요하게 된다. 하물며 선박화재의 경우에는 거의 활용이 불가능하다. 드론방식은 기본적으로 프로펠러구동이므로 팬 구동에 따라 발생하는 바람은 화재상황을 더더욱 악화시키는 요인이 되기도 한다.

결국 현재 기술은 화재현장 부근 원거리에서 소화수나 소화제를 분사하는 것^{8,9)}에 그치기 때문에 기존방법의 단순한 보완수준^{10,11)}으로 화재진압 단계에서 반드시 필요한 근원적인 어려움과 위험요인은 해소할 수 있는 기술이 아니다.

따라서 본 연구에서는 인명손실을 최소화하고 신속하게 화재진압작전을 수행할 수 있는 능동형 화재진압시스템기술^{12,13)}을 제안한다. 가능한 화재발생지점 가까운 위치까지 접근하여 신속하게 화재를 진압하기 위해서는 살수장치의 효과적인 운동제어시스템구축이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 윌트제트방식 액추에이터를 가진 이동형 살수장치의 물리특성을 파악하고 모델링을 수행한다. 이를 기반으로 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 시스템의 유효성을 검증하도록 한다.

2. 제어대상 시스템 표현

본 연구에서 제안하는 화재진압용 살수장치는 화재발생 지점까지 윌트제트방식 액추에이터의 추진력을 통해 비행하여 이동하는 시스템이다.

화재현장은 고온과 연무로 위험하고 상황파악이 어려운 환경이 대부분이다. 따라서 상황예측이 어려운 수많은 위험요소가 존재하는 화재현장에

소방인원을 직접 투입하는 것은 인명손실 위험성을 감수해야 한다는 것을 의미한다. 이러한 위험상황을 근원적으로 제거하기 위해서는 단순히 소방원을 대신하는 수준을 능가하는 기술개발과 적용이 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 화재진압뿐만 아니라, 현장상황 탐색작업을 동시에 수행할 수 있도록 하는 것이 연구의 최종목표이다.

즉, 탐색과 화재진압을 위해서는 목표지점까지 안정적이고 정확하게 이동해야 한다. 윌트제트라는 특수한 액추에이터를 이용하기 때문에 장치가 비행하는 상태에서의 정교한 운동제어가 필수적이다.

본 연구에서 제안하는 살수장치는 기본적으로 4개의 윌트제트방식 액추에이터로 구성된다. 이를 적절하게 조절함으로써 운동제어성능을 확보할 수 있게 된다. 결국, 액추에이터 노즐로부터 발생하는 추력제어를 통해 고도 유지를 포함한 6자유도 운동이 제어된다.

이와 같은 준비 아래, 6자유도 살수장치 모델의 운동상태 표현을 위해 Fig. 1과 같이 지구고정좌표계(e-frame, $o_n x_n y_n z_n$)와 물체고정좌표계(b-frame, $o_b x_b y_b z_b$)을 도입한다. 각 좌표계에서 정의되는 살수장치 운동은 변환행렬 식 (1)과 식 (2)를 통해 표현할 수 있다. $s(\cdot)$, $c(\cdot)$ 와 $t(\cdot)$ 는 각각 삼각함수 $\sin(\cdot)$, $\cos(\cdot)$, $\tan(\cdot)$ 을 나타낸다.

$$R_X = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

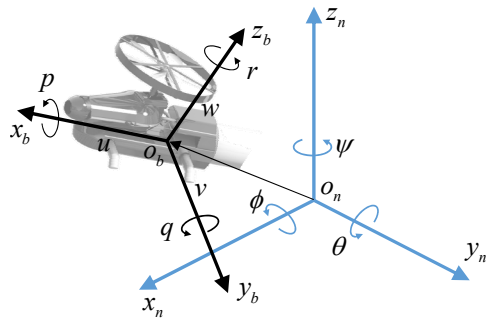


Fig. 1 Coordinate frame description of flying type fire fighting system

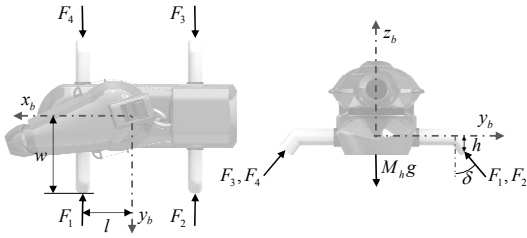


Fig. 2 Schematic drawing of flying type fire fighting system

$$\mathbf{R}_w = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 살수장치에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

그리고 4개의 액추에이터 노즐은 x_b 축과 수직 방향이면서 z_b 축과 각도 δ 를 이루고 있다. F_i ($i=1, \dots, 4$)는 노즐로부터 분사되는 구동유체에 의한 발생추력, g 는 중력가속도, M_h 는 헤드부 질량, w 와 l 은 각각 x_b 축과 y_b 축으로부터 노즐 끝단까지 거리, h 는 $x_b y_b$ 평면에서 노즐 끝단까지 거리, δ 는 z_b 축과 이루는 각도이다.

이것으로부터 살수장치 헤드부의 병진 및 회전 운동에 관한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M \frac{d\mathbf{v}_b}{dt_E} = M \left(\frac{d\mathbf{v}_b}{dt_E} + \boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{v}_b \right) = \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} \frac{d\boldsymbol{\omega}_b}{dt_E} = \mathbf{J} \frac{d\boldsymbol{\omega}_b}{dt_b} + \boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}_b = \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서, $M = M_h + M_w = M_h + k\rho A z_n$ 이며, k 는 수정계수, ρ 는 물 밀도, A 는 헤드부와 연결된 호스의 단면적을 나타낸다. 따라서 위식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_b &= M^{-1} F_{x_b} - (\omega_{by} \dot{z}_b - \omega_{bz} \dot{y}_b) \\ \ddot{y}_b &= M^{-1} F_{y_b} - (\omega_{bz} \dot{x}_b - \omega_{bx} \dot{z}_b) \\ \ddot{z}_b &= M^{-1} F_{z_b} - (\omega_{bx} \dot{y}_b - \omega_{by} \dot{x}_b) \end{aligned} \quad (5)$$

이때 $w_{b(\cdot)}$ 는 물체고정좌표계에서 표현되는 헤드부 각속도를 나타낸다. 여기서 만일 \mathbf{J} 가 대각행렬이라고 하면

$$\begin{aligned} J_{xx} \dot{\omega}_{bx} &= \tau_{x_b} - (J_{zz} - J_{yy}) \omega_{by} \omega_{bz} \\ J_{yy} \dot{\omega}_{by} &= \tau_{y_b} - (J_{xx} - J_{zz}) \omega_{bx} \omega_{bz} \\ J_{zz} \dot{\omega}_{bz} &= \tau_{z_b} - (J_{yy} - J_{xx}) \omega_{bx} \omega_{by} \end{aligned} \quad (6)$$

로 되고, 이에 따라 헤드부에 작용하는 힘은 식 (5)로부터 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{x_b} \\ F_{y_b} \\ F_{z_b} \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix} + Mg \mathbf{R}_X^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} + \mathbf{F}_d \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho\alpha} s\delta (-\dot{m}_1^2 - \dot{m}_2^2 + \dot{m}_3^2 + \dot{m}_4^2) \\ -\dot{y}_b \sum \dot{m}_i \\ \frac{1}{\rho\alpha} c\delta \sum \dot{m}_i^2 - \dot{z}_b \sum \dot{m}_i \end{bmatrix} \\ &\quad + Mg \begin{bmatrix} s\theta \\ -c\theta s\phi \\ -c\theta c\phi \end{bmatrix} + \mathbf{F}_d \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, α 는 워터제트 액추에이터 노즐 단면적, \dot{m}_i ($i=1, \dots, 4$)는 각 노즐을 통과하는 유체의 질량 유량을 나타낸다. 또한, 토크벡터는 식 (6)으로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_{x_b} \\ \tau_{y_b} \\ \tau_{z_b} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\omega_{bx} (h^2 + w^2) \sum \dot{m}_i \\ -\omega_{by} l^2 \sum \dot{m}_i \\ \omega_{bz} l^2 (\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \dot{m}_4) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\tau}_d \\ &\quad + \frac{1}{\rho\alpha} \begin{bmatrix} (wc\delta - hs\delta) (\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - \dot{m}_3^2 - \dot{m}_4^2) \\ lc\delta (-\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 + \dot{m}_3^2 - \dot{m}_4^2) \\ ls\delta (-\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - \dot{m}_3^2 + \dot{m}_4^2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

이제 워터제트 액추에이터 노즐을 통과하는 유체의 질량유량 조합을 다음과 같은 제어력 함수로 사상한다.

$$\begin{aligned} U_1 &= \sum \dot{m}_i^2 - g \frac{M_h \rho \alpha}{\cos \delta} \\ U_2 &= \dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - \dot{m}_3^2 - \dot{m}_4^2 \\ U_3 &= -\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 + \dot{m}_3^2 - \dot{m}_4^2 \\ U_4 &= -\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - \dot{m}_3^2 + \dot{m}_4^2 \end{aligned} \quad (9)$$

각 좌표계에서 살수장치 운동에 대한 상태를 $\mathbf{X} = [x_n \ y_n \ z_n \ \phi \ \theta \ \psi]^T$, $\dot{\mathbf{X}}_b = [\dot{x}_b \ \dot{y}_b \ \dot{z}_b \ \dot{\omega}_{bx} \ \dot{\omega}_{by} \ \dot{\omega}_{bz}]^T$ 으로 정의하면 두 좌표계에 대한 운동상태는 식 (10)으로 나타낼 수 있고, 따라서 시스템 운동방정식은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_b \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \frac{M\rho\alpha}{s\delta} \ddot{y}_b + \frac{J_{xx}\rho\alpha}{wc\delta - hs\delta} \dot{\omega}_{bx} \\ \ddot{z}_b \\ \dot{\omega}_{bx} \\ \dot{\omega}_{by} \\ \dot{\omega}_{bz} \end{bmatrix} = \quad (11)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c\delta}{M\rho\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{wc\delta - hs\delta}{J_{xx}\rho\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{lc\delta}{J_{yy}\rho\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{ls\delta}{J_{zz}\rho\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} gs\theta \\ -\frac{M\rho\alpha}{s\delta} gc\theta s\phi \\ gc\theta c\phi + g\frac{M_h}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_{y\phi} \\ d \end{bmatrix}$$

$$d_x = \frac{1}{M}(-\omega_{by}\dot{z}_b + \omega_{bz}\dot{y}_b + F_{dx})$$

$$d_y = -\frac{M\rho\alpha}{s\delta} \frac{1}{M} \dot{y}_b \sum \dot{m}_i - \frac{J_{xx}\rho\alpha}{wc\delta - hs\delta} \frac{1}{J_{xx}} \omega_{bx} (h+w) \sum \dot{m}_i + \frac{M\rho\alpha}{s\delta} \frac{1}{M} (-\omega_{bz}\dot{x}_b + \omega_{bx}\dot{z}_b + F_{dy}) + \frac{J_{xx}\rho\alpha}{wc\delta - hs\delta} \frac{1}{J_{xx}} (- (J_{zz} - J_{yy}) \omega_{by} \omega_{bz} + \tau_{dx})$$

$$d_z = -\frac{1}{M} \dot{z}_b \sum \dot{m}_i + \frac{1}{M} (-\omega_{bx}\dot{y}_b + \omega_{by}\dot{x}_b + F_{dz})$$

$$d_\phi = -\frac{1}{J_{xx}} \omega_{bx} (h+w) \sum \dot{m}_i + \frac{1}{J_{xx}} (- (J_{zz} - J_{yy}) \omega_{by} \omega_{bz} + \tau_{dx})$$

$$d_\theta = -\frac{1}{J_{yy}} \omega_{by} l^2 \sum \dot{m}_i + \frac{1}{J_{yy}} (- (J_{xx} - J_{zz}) \omega_{bx} \omega_{bz} + \tau_{dy})$$

$$d_\psi = -\frac{1}{J_{zz}} \omega_{bz} l^2 (-\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_4) + \frac{1}{J_{zz}} (- (J_{yy} - J_{xx}) \omega_{bx} \omega_{by} + \tau_{dz})$$

여기서 파라미터 변동 및 바람, 헤드부와 연결된 호스 등에 의한 영향은 불확실한 외란($F_d(\cdot)$, $\tau_d(\cdot)$)으로 고려한다.

3. 제어기 설계

살수장치는 4개의 윌터제트형 액추에이터로부터 추진력을 확보하게 되는데, 구동특성상 구동유체흐름방향은 의미가 없고 강약의 조절만 고려하면 된다. 따라서 각 노즐을 통과하는 질량유량은 $0 \leq \dot{m}_i \leq \dot{m}_{\max}$ 이라고 한다면 제어력 함수 식 (9)는 다음의 부등식으로 나타내어진다.

$$-g \frac{M_h \rho \alpha}{\cos \delta} \leq U_1 \leq 4 \dot{m}_{\max}^2 - g \frac{M_h \rho \alpha}{\cos \delta}$$

$$-2 \dot{m}_{\max}^2 \leq U_2 \leq 2 \dot{m}_{\max}^2$$

$$-2 \dot{m}_{\max}^2 \leq U_3 \leq 2 \dot{m}_{\max}^2$$

$$-2 \dot{m}_{\max}^2 \leq U_4 \leq 2 \dot{m}_{\max}^2 \quad (12)$$

식 (12)에서, 각 요소가 4개 노즐로 방출되는 질량유량의 조합인 것을 고려할 때, 종운동 및 횡운동은 롤(roll)과 피치(pitch)운동에 서로 영향을 미치기 때문에 underactuated system이며, 제어입력간 연성(coupling)관계가 존재한다는 것을 알 수 있다.

그러나 수직방향 운동과 요(yaw)운동은 제어입력간 연성 없이 U_1 과 U_4 만을 이용하여 제어할 수 있다. 이러한 사실을 기반으로 제어계 설계를 위해 다음과 같은 가정을 둔다.

- $M \approx M_h$
- 식 (12)의 포화는 동시에 발생하지 않음
- $\dot{\mathbf{R}}_X \approx \mathbf{R}_X$

위 사항을 고려하여 슬라이딩모드 제어기법에 따라 고도·위치제어기 및 자세제어기를 설계하고, PID제어기법과의 비교평가도 수행한다.

3.1 고도 및 위치 제어기 설계

슬라이딩모드 제어기법에 따라 고도 및 위치제어를 위한 제어기를 설계한다. 이를 위해 먼저 지구고정좌표계에서 표현되는 살수장치 헤드부의 위치를 $\mathbf{X}_n = [x_n \ y_n \ z_n]^T$ 으로 두고 상태오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{e}_X = \mathbf{X}_{nd} + \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J_{xx}s\delta}{M_h(wc\delta - hs\delta)} \int_0^t w_{brd}(t) dt \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{X}_n - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J_{xx}s\delta}{M_h(wc\delta - hs\delta)} \int_0^t w_{br}(t) dt \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, w_{brd} 는 w_{br} 의 기준값이다. 이때 $w_{brd} = 0$ 으로 두면 식 (13)의 상태오차는

$$\mathbf{e}_X = \mathbf{X}_{nd} - \mathbf{X}_n - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J_{xx}s\delta}{M_h(wc\delta - hs\delta)} \int_0^t w_{br}(t) dt \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

로 되고 이것의 미분은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{e}}_X = \dot{\mathbf{X}}_{nd} - \dot{\mathbf{X}}_n - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J_{xx}s\delta}{M_h(wc\delta - hs\delta)} \omega_{xb} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{X}}_{nd} - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \dot{y}_b + \frac{J_{xx}s\delta}{M_h(wc\delta - hs\delta)} \omega_{xb} \\ \dot{z}_b \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 슬라이딩모드 제어기 설계를 위한 슬라이딩 평면을 식 (16)과 같이 정의하고 이것을 미분하면 식 (17)이 구해진다.

$$\mathbf{s}_X = \dot{\mathbf{e}}_X + \mathbf{n}_{z1}\mathbf{e}_X + \mathbf{n}_{z2} \int_0^t \mathbf{e}_X(\tau) d\tau \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{s}}_X = \ddot{\mathbf{e}}_X + \mathbf{n}_{z1}\dot{\mathbf{e}}_X + \mathbf{n}_{z2}\mathbf{e}_X \quad (17)$$

$$= \ddot{\mathbf{X}}_{nd} - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \ddot{y}_b + \frac{J_{xx}\sin\delta}{M_h(wc\cos\delta - hs\sin\delta)} \ddot{\omega}_{xb} \\ \ddot{z}_b \end{bmatrix} + \mathbf{n}_{z1}\dot{\mathbf{e}}_X + \mathbf{n}_{z2}\mathbf{e}_X = \ddot{\mathbf{X}}_{nd} + \mathbf{n}_{z1}\dot{\mathbf{e}}_X + \mathbf{n}_{z2}\mathbf{e}_X - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} gs\theta \\ -gc\theta s\phi \\ \frac{c\delta}{M\rho\alpha} U_1 \end{bmatrix} - \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} d_x \\ d_y + U_2 \frac{s\delta}{\rho\alpha} \left(\frac{1}{M_h} - \frac{1}{M} \right) \\ d_z - g \left(c\theta c\phi - \frac{M_h}{M} \right) \end{bmatrix}$$

이것으로부터 슬라이딩모드 제어기의 제어입력을 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} gs\theta \\ -gc\theta s\phi \\ \frac{c\delta}{M\rho\alpha} U_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_X^{-1}(\mathbf{n}_{z1}\dot{\mathbf{e}}_X + \mathbf{n}_{z2}\mathbf{e}_X + \mathbf{K}_X f(\mathbf{s}_X)) \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_d = \arcsin \frac{u_x}{g} \\ \phi_d = \arcsin \left(\frac{u_y}{-g\cos\theta} \right) \\ U_1 = \frac{M_h\rho\alpha}{c\delta} u_z \end{cases} \quad (18)$$

여기서, $f(\mathbf{s}_X) = [s_{X_x} \ s_{X_y} \ \text{sign}(s_{X_z})]^T$ 이며, θ_d 와 ϕ_d 는 연속함수, $U_2 \frac{s\delta}{\rho\alpha} \left(\frac{1}{M_h} - \frac{1}{M} \right)$ 는 매우 작고 계측 불가능한 입력외란으로 가정한다.

또한 안정성해석을 위해 다음의 리아푸노프 함수를 도입하면

$$V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{s}_X^T \mathbf{s}_X \quad (19)$$

식 (19)의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{s}_X^T \dot{\mathbf{s}}_X \quad (20) \\ &= \mathbf{s}_X^T \left[\ddot{\mathbf{X}}_{nd} - \mathbf{K}_X f(\mathbf{s}_X) - \mathbf{R}_X \begin{pmatrix} d_y + U_2 \frac{s\delta}{\rho\alpha} \left(\frac{1}{M_h} - \frac{1}{M} \right) \\ d_z - g \left(c\theta c\phi - \frac{M_h}{M} \right) \end{pmatrix} \right] \\ &= s_{Xz} (-K_{Xz} \text{sign}(s_{Xz}) + D_z) \\ &\quad + s_{Xx} (-K_{Xx} s_{Xx} + D_x) \\ &\quad + s_{Xy} (-K_{Xy} \text{sign}(s_{Xy}) + D_y) \\ &= -|s_{Xz}| (K_{Xz} - D_z \text{sign}(s_{Xz})) \\ &\quad - s_{Xx}^2 (K_{Xx} - \frac{D_x}{s_{Xx}}) - s_{Xy}^2 (K_{Xy} - \frac{D_y}{s_{Xy}}) \end{aligned}$$

여기서,

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_{nd} - \mathbf{R}_X \begin{pmatrix} d_y + U_2 \frac{s\delta}{\rho\alpha} \left(\frac{1}{M_h} - \frac{1}{M} \right) \\ d_z - g \left(c\theta c\phi - \frac{M_h}{M} \right) \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (21)$$

결국 \dot{V}_1 는 아래 식 (22)에 나타낸 두 조건을 동시에 만족할 때 negative definite(< 0)가 된다.

$$\begin{cases} K_{Xz} > \max(D_z) \\ s_{Xx} > \frac{D_x}{K_{Xx}} \\ s_{Xy} > \frac{D_y}{K_{Xy}} \end{cases} \quad (22)$$

식 (22)가 성립할 때 s_{Xz} 는 항상 0에 수렴하지만, s_{Xx} 와 s_{Xy} 는 각 슬라이딩평면이 정의된 범위에 있어야 한다. 이 사실은 결국 궁극균일유계(ultimate uniformly boundedness) 조건을 만족해야 한다는 것을 의미한다.

3.2 자세 제어기 설계

살수장치 자세제어기 또한 슬라이딩모드 제어기법으로 설계한다. 먼저 살수장치 헤드부의 오일

러 각도를 $\Phi = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ 으로 두고, 상태오차를 식 (23)으로 정의하면 식 (23)의 미분은 식 (24)와 같다.

$$\mathbf{e}_\Phi = \Phi_d - \Phi = \begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \\ \psi_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_\Phi = \dot{\Phi}_d - \dot{\Phi} = \dot{\Phi}_d - \mathbf{R}_W \boldsymbol{\omega}_b \quad (24)$$

슬라이딩모드 제어기 설계법의 일반적인 절차에 따라 슬라이딩 평면을 식 (25)로 정의하면 이의 미분은 식 (26)과 같다.

$$\mathbf{s}_\Phi = \dot{\mathbf{e}}_\Phi + \mathbf{n}_\Phi \mathbf{e}_\Phi \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}}_\Phi &= \ddot{\mathbf{e}}_\Phi + \mathbf{n}_\Phi \dot{\mathbf{e}}_\Phi \quad (26) \\ &= \ddot{\Phi}_d - \mathbf{R}_W \boldsymbol{\omega}_b + \mathbf{n}_\Phi \dot{\mathbf{e}}_\Phi \\ &= \ddot{\Phi}_d + \mathbf{n}_\Phi \dot{\mathbf{e}}_\Phi \end{aligned}$$

$$- \mathbf{R}_W \begin{bmatrix} \frac{wc\delta - hs\delta}{J_{xx}\rho\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{lc\delta}{J_{yy}\rho\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{ls\delta}{J_{zz}\rho\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} - \mathbf{R}_W \begin{bmatrix} d_\phi \\ d_\theta \\ d_\psi \end{bmatrix}$$

따라서 자세제어를 위한 슬라이딩모드 제어기 제어입력은 식 (27)과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \rho\alpha \begin{bmatrix} \frac{J_{xx}}{wc\delta - hs\delta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{J_{yy}}{lc\delta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{J_{zz}}{ls\delta} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_W^{-1} (\mathbf{n}_\Phi \dot{\mathbf{e}}_\Phi + \mathbf{K}_\Phi \text{sign}(\mathbf{s}_\Phi)) \quad (27)$$

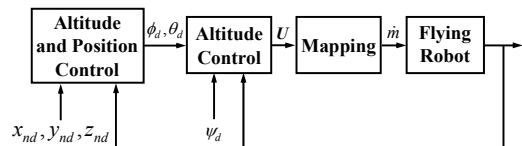


Fig. 3 Block diagram of motion control system for flying type fire fighting system

$sign(\mathbf{s}_\Phi) = diag[sign(s_{\Phi_1}) sign(s_{\Phi_2}) sign(s_{\Phi_3})]^T$ 이며, 안정성해석을 위해 다음 식 (28)의 리아프노프 함수를 도입하면 이것의 미분은 식 (29)와 같이 구해진다.

$$V_2 = \frac{1}{2} \mathbf{s}_\Phi^T \mathbf{s}_\Phi \quad (28)$$

$$\dot{V}_2 = \mathbf{s}_\Phi^T \dot{\mathbf{s}}_\Phi \quad (29)$$

$$= \mathbf{s}_\Phi^T \left(-\mathbf{K}_\Phi sign(\mathbf{s}_\Phi) + \ddot{\Phi}_d - \mathbf{R}_W \begin{bmatrix} d_\phi \\ d_\theta \\ d_\psi \end{bmatrix} \right)$$

따라서 \mathbf{K}_Φ 의 대각성분이 $\ddot{\Phi}_d - \mathbf{R}_W[d_\phi, d_\theta, d_\psi]^T$ 의 상계(upper-bound)보다 크면 시스템의 안정성은 보장된다.

결과적으로 고도·위치제어기와 자세제어기를 포함하는 살수장치 운동제어시스템은 Fig. 3의 블록선도와 같다.

3.3 PID제어기 설계

살수장치 모션제어를 위한 제어계의 성능평가를 위해 고전적인 제어기법 중 하나인 PID제어기법을 도입하고, 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 비교 평가한다. 이를 위하여 시스템 상태오차를 다음과 같이 다시 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_{bx} \\ e_{by} \\ e_{bz} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_X^{-1}(\mathbf{X}_{nd} - \mathbf{X}_n) \quad (30)$$

$$- \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J_{xx} \sin \delta}{M_h (w \cos \delta - h \sin \delta)} \int_0^t w_{xb}(t) dt \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{e}_\Phi = \begin{bmatrix} e_\phi \\ e_\theta \\ e_\psi \end{bmatrix} = \Phi_d - \Phi \quad (31)$$

식 (30)과 식 (31)에 따라 PID제어기로부터 얻어지는 제어신호는 식 (32)와 같이 계산된다.

여기서, 제어입력은 $u_j \in \{\theta_d, \phi_d, U_1, U_2, U_3, U_4\}$, 상태오차는 $e_j \in \{e_{bx}, e_{by}, e_{bz}, e_\phi, e_\theta, e_\psi\}$ 와 같이 정의한다.

$$u_j = K_{pj} e_j + K_{ij} \int_0^t e_j(\iota) d\iota \quad (32)$$

$$+ K_{dj} \frac{N_j}{1 + N_j \int_0^t e_j(\iota) d\iota}, (j=1, \dots, 6)$$

PID제어기 각각의 이득은 SIMC법칙을 이용하여 최적값을 구하였다.¹⁴⁾

$$K_{pj} = \frac{1}{4k_j(\kappa_{cj} + \kappa_{oj})^2} \quad (33)$$

$$K_{ij} = \frac{K_{pj}}{4(\kappa_{cj} + \kappa_{oj})}$$

$$K_{dj} = 4K_{pj}(\kappa_{cj} + \kappa_{oj})$$

여기서, k_j 는 확산이득(process gain), κ_{oj} 는 시간지연, 그리고 $k_j \in \left\{ g, -g, \frac{c\delta}{M_h}, \frac{w\delta - h\delta}{J_{xx}}, \frac{lc\delta}{J_{yy}}, \frac{ls\delta}{J_{zz}} \right\}$ 는 각각 u_j 성분에 대응하는 값이며, κ_{cj} 는 제어기 설계변수이다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션 대상인 살수장치의 물리파라미터는 설계 제작 중인 파일럿 모델의 규격 및 기초시뮬레이션 결과로부터 Table 1과 같이 설정하였다.

지금부터는 시뮬레이션 방법에 대해 구체적으로 설명한다. 두 가지 시나리오를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 살수장치 고도제어와 위치제어 성능을 평가하고, 두 번째는 6자유도 모션제어성능을 평가하도록 한다. 고도제어와 위치제어 성능평가를 위해 정지상태에서 살수장치를 2 m 상승시킨다. 그리고 사각형을 그리면서 각각 2 m씩 이동 후 원위치에 복귀하도록 운동경로를 설정하였다.

Table 1 Parameter values of flying type fire fighting system used in simulation

Parameter	Value	Unit
M_h	2	kg
J	diag(0.0071, 0.0085, 0.0133)	kg·m ²
l	0.5	m
w	0.4	m
h	0.1	m
δ	45	deg
ρ	1000	kg/m ³
A	4.91×10^{-4}	m ²
α	7.85×10^{-5}	m ²
k	1.5	-

이에 따른 시뮬레이션결과를 Fig. 4~6에 나타내었다. 그림에서 파랑색 실선은 슬라이딩모드 제어기를 적용한 경우, 붉은색 점선은 PID 제어기를 적용한 경우의 응답을 각각 나타내고 있다. 먼저 Fig. 4는 상승해서 사각형의 설정경로를 추종하는 과정을 나타내고 있다. 이때 PID의 경우에는 출발점에서 상승하는 순간부터 과도한 오버슈트 현상이 발생함과 동시에, 슬라이딩모드 제어기의 경우에 비해 큰 경로 추종오차도 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 살수장치 헤드부의 자세, 즉 롤, 피치, 요 운동 및 고도제어성능을 동시에 나타낸다. Fig. 4의 경로추종성능 평가결과와 유사한 결과를 나타내고 있다. 슬라이딩모드 제어기를 적용한 경우에는 과도상태에서 다소 큰 오버슈트가 발생하나

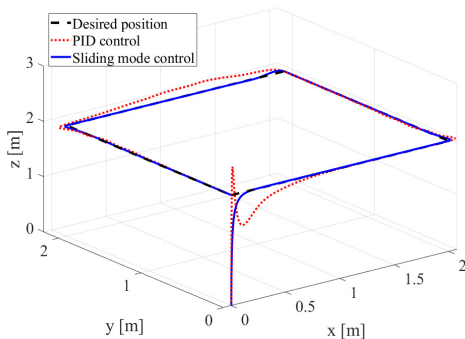


Fig. 4 Tracking performances for rectangular type trajectory

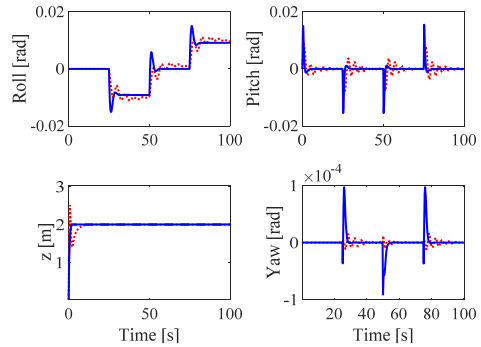


Fig. 5 Motion control performances

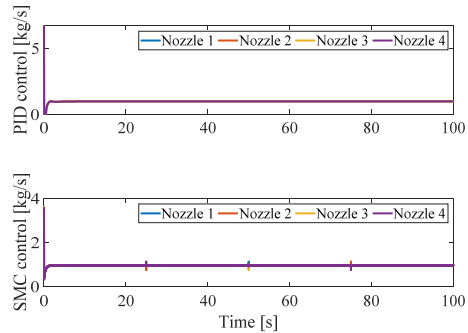


Fig. 6 Actuation forces

정상상태에서는 오차 없이 목표값을 잘 추종하고 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 PID 제어기를 적용한 경우에는 정상상태에서도 진동형태의 지속되고 목표값에 이르기까지 상당한 시간이 소요된다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 6은 각각의 워트제트 액추에이터 노즐로부터의 질량유량, 즉 제어력을 나타내고 있다. 결론적으로, 제안하는 시스템에 대한 모델을 기반으로 제어기를 설계하고, 시스템 특성을 고려한 적절한 제어기 적용을 통해 우수한 제어성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 신속한 화재진압을 통해 인명 및 재산손실을 최소화할 수 있는 능동형 소화수 살수장치를 제안하였다. 살수장치는 비행이 가능한 구조이며 원격제어를 통해 위험하고 불확실한

환경에서도 화재진압이 가능한 시스템이다. 신속하게 이동하여 화재를 조기에 진압하기 위해서는 살수장치의 효과적인 운동제어시스템구축이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 워트제트방식 액추에이터를 가진 이동형 살수장치의 물리특성을 파악하고 모델링을 수행하였다. 이를 기반으로 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 시스템의 유효성을 검증하였다.

살수장치의 규모 등 파일럿 모델의 물리적 특성을 적절하게 고려하였으며, 이로부터 도출된 물리파라미터를 기반으로 모델링과 제어기를 설계하였다. PID 및 슬라이딩모드 제어기를 각각 설계하고 비교평가를 수행하였다.

이 결과를 토대로 향후 파일럿 모델의 제작 및 실험을 통해 제안한 능동형 살수장치의 유효성을 검증할 계획이다.

Author contributions

Y. B. Kim; Conceptualization. H. Think; Data curation. H. Think; Formal analysis. Y. B. Kim; Funding acquisition. H. Think; Investigation. T. N. Nguyen; Methodology. Y. B. Kim; Project administration. H. Think; Resources. H. Think and T. N. Nguyen; Software. Y. B. Kim; Supervision. H. Think; Validation. H. Think; Visualization. H. Think; Writing-original draft. Y. B. Kim; Writing-review & editing.

References

1. J. S. You and Y. J. Chung, 2015, "Study on the Ship Fire Analysis According to Explosion Hazard", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 80-86. (<https://doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.1.080>)
2. R. Bogue, 2021, "The Role of Robots in Firefighting", *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, Vol. 48, No. 2, pp. 174-178. (DOI:10.1108/IR-10-2020-0222)
3. V. Spurny, V. Pritzl, V. Walter, M. Petrlík, T. Baca, P. Stepan, D. Zaitlík and M. Saska, 2021, "Autonomous Firefighting Inside Buildings by an Unmanned Aerial Vehicle", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 15872-15890. (DOI:10.1109/ACCESS.2021.3052967)
4. 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*, Vol. 5, No. 2, pp. 2674-2681. (DOI:10.1109/LRA.2020.2972827)
5. H. X. Pham, H. M. La, D. Feil-Seifer and M. C. Deans, 2020, "A Distributed Control Framework of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Dynamic Wildfire Tracking", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 50, No. 4, 1537-1548. (DOI:10.1109/TSMC.2018.2815988)
6. E. Ausonio, P. Bagnnerini and M. Ghio, 2021, "Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A conceptual framework", *Drones*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-22. (DOI:10.3390/drones5010017)
7. K. A. Ghamry, M. A. Kamel and Y. Zhang, 2017, "Multiple UAVs in Forest Fire Fighting Mission Using Particle Swarm Optimization", 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1404-1409. (DOI:10.1109/ICUAS.2017.7991527)
8. J. D. Bae, K. M. Li, T. K. Hwang, J. H. Kim, G. Y. Kong, C. K. Lee and C. W. Lee, 2019, "Performance Review of In-Line Eductor of Hose Reel Foam Station for Fire Extinguishing System of Ship", *Korea Society for Naval Science & Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 45-48. (<https://doi.org/10.31818/JKNST.2019.09.2.2.45>)
9. Y. C. Ryu, B. K. Seo, J. H. Seung, Y. H. Lee, and Y. C. Park, 2014, "Study of Computational

- Fluid Dynamics for Projection Distance Prediction of the Form Monitor", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 10, pp. 5939-5944. (<https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.10.5939>)
10. S. Y. Kim, D. S. Kim, B. H. Ahn and J. H. Kwark, 2008, "Fire Test Procedures for Flammability of Bulkhead, Ceiling and Deck Finish Materials", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 117-119.
 11. W. C. Park and C. Y. Song, 2019, "Heat Transfer Characteristics of Bulkhead Penetration Piece for A60 Class Compartment II: Fire Resistance Test for Piece Material and Insulation Types", The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 33, No. 4, pp. 340-349. (<https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.027>)
 12. M. T. Tran, T. Huynh, D. H. Lee, S. H. Jeong, K. H. Choi, J. I. Yoon, C. H. Son and Y. B. Kim, 2021, "A Study on Development of a Flying Type Fire Extinguisher with Water Jet System : Strategy for Fire Fighting", Proceedings of 2021 KSPSE Spring Conference, pp. 20-21.
 13. J. H. Cho, T. Huynh, D. H. Lee, S. H. Jeong, K. H. Choi, J. I. Yoon, C. H. Son and Y. B. Kim, 2021, "A Study on Development of a Flying Type Fire Extinguisher with Water Jet System : System Design and Modeling", Proceedings of 2021 KSPSE Spring Conference, pp. 22-23.
 14. C. Grimholt and S. Skogestad, 2016, "Optimal PID Control of Double Integrating Processes", IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, No. 7, pp. 127-132. (DOI:10.1016/j.ifacol.2016.07.228)
 15. N. Xuan-Mung and S. K. Hong, 2019, "Robust Backstepping Trajectory Tracking Control of a Quadrotor with Input Saturation via Extended State Observer", Applied Sciences, Vol. 9, No. 23(5184), pp. 1-24. (DOI:10.3390/app9235184)