

비행형 소화수 살수장치 운동제어시스템 구축에 관한 연구: 장치설계 및 모델링

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

김영복* · 응엔탄녹* · 흰틴**†

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

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

Abstract : This study presents the system design and modeling problem of a flying type fire fighting system. The fire fighting system with fire fighters works in hazardous environment. Therefore, it should be prepared with strict safety apparatus and conditions. For this reason, the authors propose a new fire fighting system that satisfies the given hard constraints. Especially, the authors propose a pilot model in conceptual point of view. In this system, the water jet based actuation system is applied to controlling the flying motion of it. In addition, the dynamic model is provided with analysis of the system dynamics. Using the model, the actuation forces, water jet system characteristics and related informations for system design are analysed. Finally, a mathematical system model is presented and simulation is performed to take useful system characteristics.

Key Words : Flying type, Fire fighting system, Fire fighter, Water jet, Hazardous environment

1. 서 론

본 연구에서는 화재를 신속하고 효과적으로 진압할 수 있는 새로운 화재진압시스템을 개발하고 운동제어를 위한 동적특성파악 및 기술적 특성분석에 대해 고찰하고 있다. 화재는 어떠한 형태로

든 누구에게나 위협하며 특히 재산 및 인명피해는 피할 수 없는 재난이다. 최근 화재의 복잡화 및 대형화로 인해 국민안전 위협성과 재난대응 어려움은 점차 증가하고 있으며, 폭발 및 구조물 붕괴로 인해 소방인원 고립 위험 등 인명손실 위험성이 지극히 높은 사회적 문제이다. 특히, 선박

**† 흰틴(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7329-8432) : 교수, 호치민시립기술교육대학교, 자동차과

E-mail : huynhthink@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

**† Think 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 : huynhthink@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.

화재의 경우에는 파랑 등이 존재하는 열악한 환경 때문에 소화작업이 근본적으로 어려우며 단순히 원거리에서 소화수를 살수하는 것이 최선이다. 육상화재와 달리, 선체를 구성하는 재료에 따라 화재진행상태는 급속하게 빨라지기도 하고, 철제선박의 경우에는 소화수를 화재 발생 근원지점까지 접근시키는 것조차 어렵다.¹⁾ 초기진압 실패는 더더욱 위험한 상황에서 소방인원이 화재현장에 투입되고, 피구조자 탐색 및 구조를 수행해야 한다. 화재현장은 항상 위험요인이 존재하고 이를 극복해야 하므로 신속한 대응이 지극히 힘들다. 그러나 신속한 진압은 피해최소화를 위한 유일한 방법일수도 있다.

신속한 화재진압을 위한 다양한 방법과 기술들이 고안되어 있으나 적절하게 대응할 수 있는 수준이 아니며, 여러 제약사항으로 인해 실제 화재진압에 활용되지 못하고 있다. 대표적인 예로, 무한궤도 또는 다륜 휠을 장착하여 장애물 및 험로 주파 등 소방인원 투입이 불가능한 지역에서도 진압작업을 수행하는 지상형 소방로봇이 있다.²⁾ 그러나 고층화, 지하화 및 복잡화 된 구조물에는 기동성이 부족하여 전혀 활용할 수 없고, 특정된 화재현장에서만 적용할 수 있어 제한적이다.

최근에는 드론을 이용한 실내외 화재진압 시스템³⁻⁵⁾ 및 이를 위한 군집비행 기법^{6,7)} 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 드론은 특성상 고온, 화염 등의 영향으로 화재현장에 근접하기 어려울 뿐만 아니라 회전익의 영향으로 인해 화염확산 등 상황을 악화시킬 수도 있다. 즉, 드론을 사용하더라도 화재현장 부근 원거리에서 소화수나 소화제를 분사하는 것^{8,9)}에 그치지 않기 때문에 기존방법의 단순한 보완수준^{10,11)}으로 화재진압단계에서 반드시 필요한 근원적인 어려움과 위험요인은 해소할 수 있는 기술이 아니다.

이러한 이유로 현재까지도 화재진압을 위해서는 소방인원에 대한 의존도가 높고, 인명손실 위험성은 여전히 해결하지 못한 실정이다. 이와 같은 현실을 고려할 때 소방인원뿐만 아니라 피구조자 입장에서의 안전성 추구는 필연적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 인명손실을 최소화하고 신속하게 화재진압작업을 수행할 수 있는 능동형 화재진압시스템을 제안하고자 한다. 제안하는 장치는 화재 발생 근원적 위치에 원격으로 신속하게 접근하여 보다 직접적이고 정밀한 소화수 분사로 조기 진화가 가능한 장치이다. 기존 화재진압 방법인 화재발생 구역 주위에 맹목적으로 쏟아 붓는 소극적 작업을 보다 공격적으로 수행함으로써 초기진압에 성공할 수 있도록 하는 것이 본 연구에서 제안하는 장치개발의 목표이다.

아울러 소방인원의 직접적인 투입 없이 원격으로 화재발생 근원적 위치까지 접근하여 인명손실 위험성을 획기적으로 줄일 수 있는 시스템을 구축하도록 한다. 본 논문에서는 이러한 목표를 달성하기 위해 비행이 가능한 소화수 살수장치 기초모델을 제시하고 이에 따른 시스템 메커니즘에 대한 평가와 동적특성을 분석하고 파악할 수 있는 수식모델을 구축하도록 한다.

2. 장치 구성

본 연구에서 제안하는 화재진압용 살수장치는 화재발생 지점까지 원격으로 이동이 가능한 시스템이다. 화재발생지점은 상태를 직접 확인할 수 없는 불확실하고 매우 위험한 상황이므로, 소방인원 대신 살수장치 자체를 화재현장에 투입하여 화재상황을 실시간으로 모니터링하면서 화재진압작업을 동시에 수행할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 살수장치 개념도를 Fig. 1에 나타내었고 시스템 구성하는 주요장치는 다음과 같다.^{12,13)}

- 소화수 및 모션제어용 제어수 공급호스

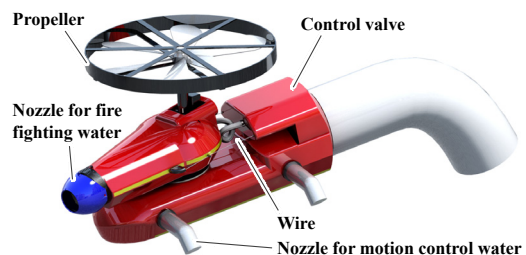


Fig. 1 Concept drawing of flying type fire fighting system

- 소화수 및 제어수 제어밸브
- 소화수 분사노즐 및 분사방향조절장치
- 프로펠러타입 추력장치 및 조종장치
- 워터제트타입 추력장치 및 조종장치
- 자이로센서, 열적외선센서 및 카메라 등
- 내열장치 및 보호장치

본 시스템에 도입되는 액추에이터는 크게 두가지로 프로펠러 타입과 워터제트타입이다.

기본적으로 워터제트 액추에이터를 이용하여 전후좌우에 배치한 4개의 분사노즐을 통해 제어수를 분사하고 이에 따른 반발력으로 살수장치의 비행운동을 제어한다.

살수장치의 비행고도가 높아 제어수 분사에 의한 추진력 확보가 부족할 경우나, 상대적으로 광범위한 공간을 신속하게 이동해야 할 경우에는 프로펠러 구동을 통해 이동한다. 화재발생시점, 즉 진입작업을 진행해야 하거나, 조절수 분사를 통해 반발력을 확보할 수 있는 조건에서는 워터제트방식으로 전환한다. 화재현장의 고온 및 화염을 고려한다면 프로펠러식 추진장치구동은 화재현장 상황을 더욱 악화시킬 수 있으므로 최대한 사용을 배제할 필요가 있다. 또한 전기장치를 사용할 경우, 고온환경으로 인해 오작동 가능성이 있으므로 제어수 및 소화수를 이용해 워터펌프를 구동하고 이를 통해 프로펠러를 회전시키는 방법이 바람직할 것이다. 이러한 상황과 조건을 감안하여 시스템을 구성함으로써 열악한 화재현장에서도 화재진압효과를 극대화할 수 있을 것이다.

3. 살수장치의 6자유도 운동 모델

살수장치 6자유도 운동방정식 모델링을 위해 먼저 좌표계를 Fig. 2와 같이 정의한다. 여기서, $o_n x_n y_n z_n$ 는 지구고정좌표계(e-frame)를 나타내고

$o_b x_b y_b z_b$ 는 물체고정좌표계(b-frame)를 나타낸다.

각 좌표계에 대한 운동상태 표현은 선속도 변환행렬 식 (1)과 각속도 변환행렬 식 (2)를 통해 표현할 수 있다. 표현의 간소화를 위해 삼각함수를 약어 $s(\cdot)$, $c(\cdot)$ 와 $t(\cdot)$ 으로 표기하였다.

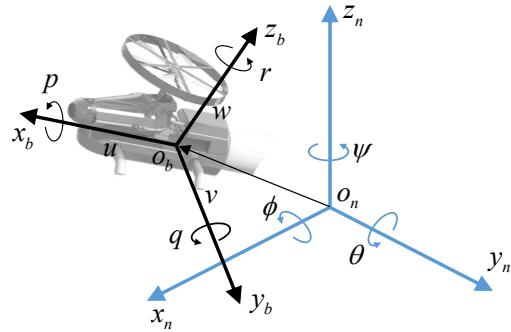


Fig. 2 Coordinate frame description of flying type fire fighting system

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

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

살수장치는 화재진압을 위해 목표지점에 안전하고 정확하게 이동해야 한다. 살수장치의 운동제어는 4개의 워터제트방식 액추에이터로 수행되며, 이를 적절하게 제어함으로써 바람직한 6자유도 운동을 얻을 수 있게 된다. 결국, 액추에이터 노즐로부터 분사되는 조절수(제어수)의 유량과 유속제어를 통해 살수장치 고도유지만만 아니라 평면운동 및 회전운동이 이루어진다. 이를 위해서는 제어수 분사각도도 적절히 선정하고 요구되는 운동상태에 따라 분사량도 조절해야 한다.

운용상의 효율성 제고와 시스템 구성 단순화를 위해 제어수 분사용 노즐은 고정식으로 고려하였다. 그래서 분사각도는 수직축과의 각도를 임의 변수로 두고 수평축과의 각도는 고정된 값으로 설정하였다.

위와 같은 사항을 고려하여 모션제어를 담당하는 4개의 워터제트방식 액추에이터에서 발생하는 추력 기반 6자유도 운동모델을 도출한다. 살수장치의 파라미터가 포함된 개략도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 표현에 따라, 살수장치 헤드부의 병진 및 회전운동에 대한 운동방정식을 표현하면 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

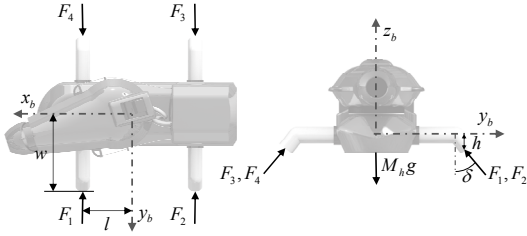


Fig. 3 Schematic of flying type fire fighting system

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

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

여기서, $M = M_h + M_w = M_h + k\rho A z_n$ 이며, M_h 는 살수장치 헤드부 질량, M_w 는 헤드부와 호스내의 소화수를 포함한 호스질량을 나타내고, ρ 는 물 밀도, A 는 호스 단면적, k 는 수정계수를 나타낸다. 그리고 식 (3)과 식 (4)는 다음과 같이 재정의된다.

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

여기서, $\omega_b(\cdot)$ 는 물체고정좌표계에서 표현되는 헤드부 각속도를 나타낸다. 그리고 \mathbf{J} 가 대각행렬 이라면

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

로 되고, 식 (5)에서 각 방향으로부터 헤드부에 작용하는 힘벡터 $F(\cdot)_b$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{x_b} \\ F_{y_b} \\ F_{z_b} \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix} + Mg\mathbf{R}_X^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} + \mathbf{F}_d \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ s\delta(-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \\ c\delta\sum F_i \end{bmatrix} + Mg \begin{bmatrix} s\theta \\ -c\theta s\phi \\ -c\theta c\phi \end{bmatrix} + \mathbf{F}_d \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $F_{i(\cdot)}$ 는 i 번째 노즐에서 발생하는 각 축방향의 힘, \mathbf{F}_d 는 헤드부에 작용하는 미지 외란 벡터, g 는 중력가속도를 나타낸다. 이와 같은 방법으로 식 (6)의 토크벡터 $\boldsymbol{\tau}(\cdot)_b$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \tau_{x_b} \\ \tau_{y_b} \\ \tau_{z_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (wc\delta - hs\delta)(F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \\ lc\delta(-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) \\ ls\delta(-F_1 + F_2 - F_3 + F_4) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (8)$$

위터제트방식 액추에이터의 추력 $F_i(i=1, \dots, 4)$ 에 대하여 다음과 같이 사상(mapping)한다.

$$\begin{aligned} u_1 &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ u_2 &= F_1 + F_2 - F_3 - F_4 \\ u_3 &= -F_1 + F_2 + F_3 - F_4 \\ u_4 &= F_1 - F_2 + F_3 - F_4 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, 사상 u_1 은 추력, u_2 는 축 y_b 에 대한 롤(roll) 운동, u_3 는 축 x_b 에 대한 피치(pitch) 운동, u_4 는 요(yaw) 운동에 관여한다.

그러나 위터제트방식 액추에이터는 소화수를 고압, 고속으로 분사하여 추력을 확보하므로 운동 모델에 구동유체 흐름을 고려하여 표현할 수도 있다.

따라서 헤드부에 작용하는 힘 식 (7)은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{x_b} \\ F_{y_b} \\ F_{z_b} \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix} + Mg\mathbf{R}_X^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} + \mathbf{F}_d \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho\alpha}s\delta(-\dot{m}_1^2 - \dot{m}_2^2 + \dot{m}_3^2 + \dot{m}_4^2) \\ \frac{1}{\rho\alpha}c\delta\sum \dot{m}_i^2 - \dot{z}_b\sum \dot{m}_i \end{bmatrix} \\ &\quad + Mg \begin{bmatrix} s\theta \\ -c\theta s\phi \\ -c\theta c\phi \end{bmatrix} + \mathbf{F}_d \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, α 는 위터제트방식 액추에이터 노즐의

단면적, $\dot{m}_i (i=1, \dots, 4)$ 는 각 노즐을 통과하는 유체의 질량유량을 나타낸다. 이것으로부터 토크벡터 식 (8)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} \tau_{xb} \\ \tau_{yb} \\ \tau_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_{bx}(h+w)\Sigma\dot{m}_i \\ -\omega_{by}l^2\Sigma\dot{m}_i \\ \omega_{bz}l^2(-\dot{m}_1+\dot{m}_2+\dot{m}_3-\dot{m}_4) \end{bmatrix} + \tau_d \quad (11)$$

$$+ \frac{1}{\rho\alpha} \begin{bmatrix} (wc\delta-hs\delta)(\dot{m}_1^2+\dot{m}_2^2-\dot{m}_3^2-\dot{m}_4^2) \\ lc\delta(-\dot{m}_1^2+\dot{m}_2^2+\dot{m}_3^2-\dot{m}_4^2) \\ ls\delta(-\dot{m}_1^2+\dot{m}_2^2-\dot{m}_3^2+\dot{m}_4^2) \end{bmatrix}$$

위터제트 액추에이터 노즐을 통과하는 유체의 질량유량을 다음과 같이 사상한다.

$$U_1 = \sum \dot{m}_i^2 - g \frac{M_h \rho \alpha}{\cos \delta} \quad (12)$$

$$U_2 = \dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - \dot{m}_3^2 - \dot{m}_4^2$$

$$U_3 = -\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 + \dot{m}_3^2 - \dot{m}_4^2$$

$$U_4 = -\dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - \dot{m}_3^2 + \dot{m}_4^2$$

각 좌표계에서 정의되는 살수장치 운동상태를 $\mathbf{X} = [x_n \ y_n \ z_n \ \phi \ \theta \ \psi]^T$, $\dot{\mathbf{X}}_b = [\dot{x}_b \ \dot{y}_b \ \dot{z}_b \ \omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]^T$ 로 정의하고 변환행렬 식 (1) 및 식 (2)를 이용하면 두 좌표계의 관계는 식 (13)으로 표현된다.

따라서 시스템 운동방정식은 식 (14)와 같이 구해진다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_b \quad (13)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_b = \begin{bmatrix} gs\theta \\ -gc\theta s\phi - \frac{s\delta}{M\rho\alpha} U_2 \\ -gc\theta c\phi + \frac{c\delta}{M\rho\alpha} U_1 + g \frac{M_h}{M} \\ \frac{wc\delta-hs\delta}{J_{xx}\rho\alpha} U_2 \\ \frac{lc\delta}{J_{yy}\rho\alpha} U_3 \\ \frac{ls\delta}{J_{zz}\rho\alpha} U_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M}\dot{y}_b\Sigma\dot{m}_i \\ -\frac{1}{M}\dot{z}_b\Sigma\dot{m}_i \\ -\frac{1}{J_{xx}}\omega_{bx}(h+w)\Sigma\dot{m}_i \\ -\frac{1}{J_{yy}}\omega_{by}l^2\Sigma\dot{m}_i \\ \frac{1}{J_{zz}}\omega_{bz}l^2(-\dot{m}_1+\dot{m}_2+\dot{m}_3-\dot{m}_4) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{M}(-\omega_{by}\dot{z}_b + \omega_{bz}\dot{y}_b + F_{dx}) \\ \frac{1}{M}(-\omega_{bx}\dot{x}_b + \omega_{bx}\dot{z}_b + F_{dy}) \\ \frac{1}{M}(-\omega_{bx}\dot{y}_b + \omega_{by}\dot{x}_b + F_{dz}) \\ \frac{1}{J_{xx}}(-(J_{zz}-J_{yy})\omega_{by}\omega_{bz} + \tau_{dx}) \\ \frac{1}{J_{yy}}(-(J_{xx}-J_{zz})\omega_{by}\omega_{bz} + \tau_{dy}) \\ \frac{1}{J_{zz}}(-(J_{yy}-J_{xx})\omega_{bx}\omega_{by} + \tau_{dz}) \end{bmatrix}$$

살수장치가 특정 지점에서 적절히 안정된 상태로 유지되거나 운동속도가 충분히 느리다면 $\phi \approx 0$, $\theta \approx 0$ 으로 둘 수 있다. 이것으로부터 식 (13)과 식 (14)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} c\psi - s\psi & \mathbf{O}_{2 \times 4} \\ s\psi & c\psi \\ \mathbf{O}_{4 \times 2} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_b \quad (15)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{2 \times 3} & 0 & g & 0 \\ \mathbf{O}_{4 \times 3} & \mathbf{O}_{4 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{X} \quad (16)$$

$$+ \frac{1}{\rho\alpha} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{s\delta}{M} & 0 & 0 \\ \frac{c\delta}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{wc\delta-hs\delta}{J_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{lc\delta}{J_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{ls\delta}{J_{zz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M}\dot{y}_b \sum \dot{m}_i \\ -g(1-\frac{M_h}{M}) - \frac{1}{M}\dot{z}_b \sum \dot{m}_i \\ -\frac{1}{J_{xx}}\omega_{xb}(h+w) \sum \dot{m}_i \\ -\frac{1}{J_{yy}}\omega_{yb}l^2 \sum \dot{m}_i \\ \frac{1}{J_{zz}}\omega_{zb}l^2(-\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_4) \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \frac{1}{M}(-\omega_{by}\dot{z}_b + \omega_{by}\dot{y}_b + F_{dx}) \\ \frac{1}{M}(-\omega_{bz}\dot{x}_b + \omega_{bx}\dot{z}_b + F_{dy}) \\ \frac{1}{M}(-\omega_{bx}\dot{y}_b + \omega_{by}\dot{x}_b + F_{dz}) \\ \frac{1}{J_{xx}}(- (J_{zz} - J_{yy})\omega_{by}\omega_{bz} + \tau_{dx}) \\ \frac{1}{J_{yy}}(- (J_{xx} - J_{zz})\omega_{by}\omega_{bz} + \tau_{dy}) \\ \frac{1}{J_{zz}}(- (J_{yy} - J_{xx})\omega_{bx}\omega_{by} + \tau_{dz}) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{6 \times 6} & \mathbf{I}_{6 \times 6} \\ 000 & 0 & g0 \\ 000 & -g & 00 \\ 000 & 0 & 00 \\ 000 & 0 & 00 \\ 000 & 0 & 00 \\ 000 & 0 & 00 \end{bmatrix} \mathbf{O}_{6 \times 6}, \\
 \mathbf{B}_w &= \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{6 \times 6} \\ \mathbf{I}_{6 \times 6} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{B}_u &= \frac{1}{\rho\alpha} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{7 \times 4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{s\delta}{M} & 0 & 0 \\ \frac{c\delta}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{wc\delta - hs\delta}{J_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{lc\delta}{J_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{ls\delta}{J_{zz}} \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

또한 ψ 가 매우 느린 속도로 변한다고 가정하면 식 (15)와 식 (16)을 다음의 식 (17) ~ (19)와 같이 정리하여 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} c\psi - s\psi & \mathbf{O}_{2 \times 4} \\ s\psi & c\psi \\ \mathbf{O}_{4 \times 2} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \mathbf{X}_b \quad (17)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi - s\psi & \mathbf{O}_{2 \times 2} \\ s\psi & c\psi \\ \mathbf{O}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \mathbf{Y}_B \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_B = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_b \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_b \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{bmatrix} + \mathbf{B}_u \mathbf{U} + \mathbf{B}_w \mathbf{w} \quad (19)$$

$$\mathbf{Y}_B = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_b \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{bmatrix}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{w} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M}\dot{y}_b \sum \dot{m}_i \\ -g(1-\frac{M_h}{M}) - \frac{1}{M}\dot{z}_b \sum \dot{m}_i \\ -\frac{1}{J_{xx}}\omega_{bx}(h+w) \sum \dot{m}_i \\ -\frac{1}{J_{yy}}\omega_{yb}l^2 \sum \dot{m}_i \\ \frac{1}{J_{zz}}\omega_{zb}l^2(-\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_4) \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \frac{1}{M}(-\omega_{by}\dot{z}_b + \omega_{by}\dot{y}_b + F_{dx}) \\ \frac{1}{M}(-\omega_{bz}\dot{x}_b + \omega_{bx}\dot{z}_b + F_{dy}) \\ \frac{1}{M}(-\omega_{bx}\dot{y}_b + \omega_{by}\dot{x}_b + F_{dz}) \\ \frac{1}{J_{xx}}(- (J_{zz} - J_{yy})\omega_{by}\omega_{bz} + \tau_{dx}) \\ \frac{1}{J_{yy}}(- (J_{xx} - J_{zz})\omega_{by}\omega_{bz} + \tau_{dy}) \\ \frac{1}{J_{zz}}(- (J_{yy} - J_{xx})\omega_{bx}\omega_{by} + \tau_{dz}) \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

$$C = \begin{bmatrix} 100000 \\ 010000 \\ O_{4 \times 6} \\ 001000 \\ 000001 \end{bmatrix}$$

4. 시뮬레이션 평가

살수장치 운동모델에 대한 유효성을 평가하고 파일럿모델제작을 위해서는 펌프용량 등 장치에 대한 세부사양을 결정해야 한다. 이를 위해 3장에서 구한 수식모델을 기반으로 운동제어 목표를 설정하고 다양한 시뮬레이션을 수행한다. 즉, 기본목적인 고도 및 자세제어를 위해 운동특성을 분석함으로써 그 결과에 대해 고찰하도록 한다.

본 연구에서는 시스템 운동특성을 분석하는 것이 목적이므로, 고도 및 자세제어를 위해 고전적인 제어기법 중 하나인 PID제어기법을 도입한다. 이를 위해 먼저 시스템 상태오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_{bx} \\ e_{by} \\ e_{bz} \end{bmatrix} = R_X^{-1}e_X = R_X^{-1}(X_d - X) \quad (20)$$

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

$$\begin{bmatrix} e_\phi \\ e_\theta \\ e_\psi \end{bmatrix} = e_\Phi = \Phi_d - \Phi \quad (21)$$

상태오차를 나타낸 식 (20)과 식 (21)에 따라 PID제어기로부터 얻어지는 제어신호는 다음과 같이 계산된다.

$$u_j = K_{pj}e_j + K_{ij} \int_0^t e_j(\tau) d\tau \quad (22)$$

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

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. 시뮬레이션에 사용된 살수장치 파라미터는 설계 및 제작 진행 중인 파일럿 모델규모를 고려하여 예상치를 설정하였다. 그런 후 설정값을 기준으로 적절히 조절해 가면서 기대수준의 응답특성을 얻을 때까지 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 사용한 물리파라미터는 Table 1에 정리하였다.

시뮬레이션 방법에 대해 구체적으로 설명한다. 살수장치 헤드부 고도제어와 자세제어 시뮬레이션을 위해 고도 3 m에서 20 sec 간격으로 2 m 하강과 상승을 반복하고, 정면을 기준으로 ± 45 deg 범위에서 요 운동하도록 목표값을 설정하였다.

이에 대한 시뮬레이션결과를 Fig. 4-6에 나타내었다.

Fig. 4는 헤드부의 고도와 요 운동 결과를 나타내고, Fig. 5는 헤드부의 (x_n, y_n) 위치, 롤 운동, 피치운동 응답을 각각 나타낸다. 그리고 Fig. 6은 액추에이터 노즐로부터 방출되는 구동유체의 질량유량을 나타낸다. Fig. 4와 Fig. 5에서 초기시간에 헤드부가 목표고도로 급격히 이동하였다가 과도상태를 지난 정상상태에서는 목표값에 안정적으로 정착하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Parameter 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	-

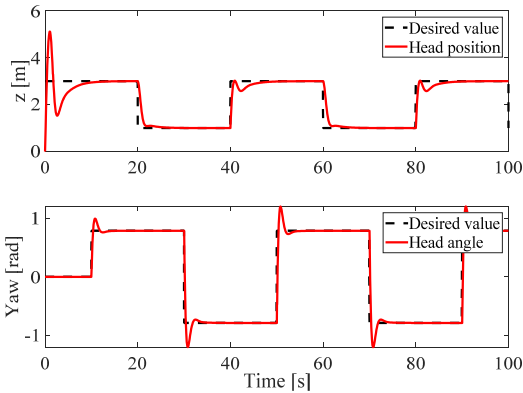


Fig. 4 Altitude and yaw motion response

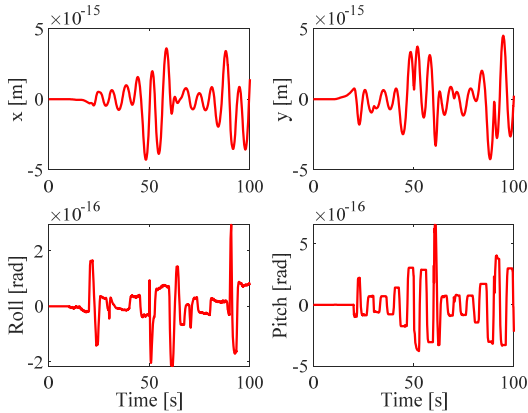


Fig. 5 Motion response in altitude and attitude control simulation

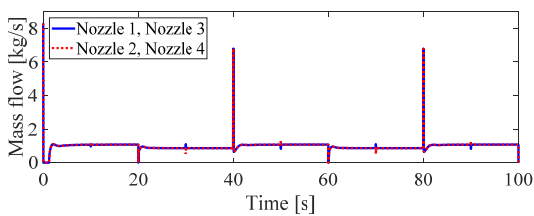


Fig. 6 Mass flow result in altitude and attitude control simulation

즉, 과도상태에서는 목표값을 초과하는 오버슈트 현상이 발생하나 정상상태에서는 오차 없이 목표값을 유지한다. 그리고 일단 목표로 하는 고도에 도달한 이후에는 어느 정도의 목표값이 변하더라도 과도상태에서도 큰 오버슈트가 발생하

지 않고 안정적인 위치제어특성을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6에 나타난 질량유량 특성에서는 목표값이 변하는 위치에서 유량이 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 살수장치 헤드부 기준경로를 운용환경에 맞춰 적절한 속도를 나타내는 연속함수로 고려한다면 아무런 문제가 되지 않는다. 그러나 목표값이 극단적으로 변하는 구간 외에는 유량값이 1.3 kg/s 이하 수준이고, 이것으로부터 체적유량으로 환산하여 펌프 요구사양을 결정하면 된다.

본 연구에서는 제어기설계를 통한 제어성능을 확보하는 것이 아니라, 제안한 살수장치의 운동특성을 분석하고 이것으로부터 살수장치로서의 유효한 특성을 확보할 수 있는지를 확인하는 것이 목적이다. 시뮬레이션에서는 가장 기본적인 제어기법의 적용만으로도 유효한 운동제어성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 보다 고수준의 제어기법 적용을 통해 바람직한 제어성능을 확보할 수 있을 것이며, 살수장치로서의 기능을 충분히 발휘할 수 있는 기술개발이 가능할 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 신속한 화재진압을 통해 재산 및 인명손실 위험성을 최소화할 수 있는 새로운 화재진압용 살수장치를 제안하였다. 원격제어를 통해 시스템을 조작함으로써 소방인원이 접근하기 어렵거나 위험한 지역에 안전하게 접근하여 임무를 수행할 수 있는 구조이다. 고온 및 화염 환경에서도 화재진압과 상황탐색이 가능하도록 워트제트방식의 액추에이터를 고안하였다. 본 장치는 비행이 가능한 구조이며, 액추에이터 제어를 통한 운동제어시스템 설계를 위해 장치에 대한 수식모델을 도출하였고, 이를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템의 중요 파라미터에 대한 기준값을 설정해 두고 수차에 걸친 시뮬레이션 결과로부터 적절한 값을 선정하였다. 이것으로부터 소화수 공급용 펌프규격 등 파일럿 모델을 구

성하는 주요 장치의 규격을 결정할 수 있다.

또한 PID제어기를 적용한 시뮬레이션 결과부터 고안된 살수장치의 우수한 운동특성을 확인할 수 있었다. 향후에는 고수준의 제어기를 설계하고 시뮬레이션과 실험을 수행함으로써 제안하는 시스템의 유효성을 보다 구체적으로 검증할 계획이다.

Author contributions

Y. B. Kim; Conceptualization. T. N. Nguyen; Data curation. H. Think; Formal analysis. Y. B. Kim; Funding acquisition. T. N. Nguyen; Investigation. H. Think; Methodology. Y. B. Kim; Project administration. T. N. Nguyen; Resources. H. Think; Software. Y. B. Kim; Supervision. H. Think; Validation. T. N. Nguyen; Visualization. T. N. Nguyen; 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. Petrlik, T. Baca, P. Stepan, D. Zaitlik 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, pp. 1537-1548.
(DOI:10.1109/TSMC.2018.2815988)
6. E. Ausonio, P. Bagnerini and M. Ghio, 2021, "Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework", *Drones*, Vol. 5, No. 1(17), 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.